

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

Dominik Hóta

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

**Technická diagnostika vodních čerpadel
v těžkém průmyslu**

Technical Diagnostic of Water Pumps in
Heavy Industry

Student:

Dominik Hóta

Vedoucí bakalářské práce

Ing. Jan Blata, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student: **Dominik Hóta**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování**
Téma: **Technická diagnostika vodních čerpadel v těžkém průmyslu**
Technical Diagnostic of Water Pumps in Heavy Industry
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce se zabývejte problematikou technické diagnostiky čerpadel se zaměřením na vibrodiagnostiku. Rozeberte tuto problematiku, navrhněte a zvažte vhodné metody pro sledování jejich technického stavu, zvolte vhodná místa pro umístění snímačů. Popište přístrojovou techniku a softwarové nastavení pro tuto aplikaci. Proveďte potřebná měření a vyhodnocení naměřených dat.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Rozsah práce min. 35 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6
- HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.
- TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.
- KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6
- KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4
- BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej*,

teoria i praktika. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

ČSN ISO 10 816 *Vibrace-Hodnocení vibrační strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o horizontálních a vertikálních čerpadlech od firmy Třinecké železářny a.s., firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 20.5.2019

Kola

.....
Podpis studenta

Prohlášení spolupracující osoby


Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 6, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských studijních programech VŠB-TU Ostrava.

Spolupracující společnost:

Třinecké železářny a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, IČO: 18050646

Jméno a příjmení oprávněné osoby: Bronislav Rusz

V Ostravě dne 20. 5. 2019



.....
Podpis oprávněné osoby

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.5.2019

Hóta

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Dominik Hóta

Adresa trvalého bydliště: Milíkov 178, 739 81 Milíkov

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HÓTA, Dominik. *Technická diagnostika vodních čerpadel v těžkém průmyslu*. Ostrava, 2019. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Blata, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá technickou diagnostikou vodních čerpadel v těžkém průmyslu se zaměřením na vibrodiagnostiku. Specifické zaměření bylo věnováno především vertikálním a horizontálním čerpadlům typu Warman, které plní svoji funkci jako kalová čerpadla. Teoretická část je věnována analýze dané problematiky a jednotlivým druhům bezdemontážních diagnostických technik. Hlavním cílem práce je vyhodnocení naměřených dat, které slouží k určení technického stavu zařízení.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

HÓTA, Dominik. *Technical Diagnostic of Water Pumps in Heavy Industry*. Ostrava, 2019. Bachelor thesis. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Blata, Ph.D.

The bachelor thesis deals with technical diagnostics of water pumps in heavy industry with focus on vibrodiagnostics. Particular attention was paid to vertical and horizontal pumps that function as sludge pumps. The theoretical work is devoted to the analysis of the issue and individual types of non-dismantling diagnostic techniques. The main goal of the thesis is to evaluate the measured data, which are used to determine the technical condition of the equipment.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	11
Seznam použitých zkratk	12
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	15
Úvod	- 13 -
1 Vibrodiagnostika	- 14 -
1.1 Historický vývoj vibrodiagnostiky	- 14 -
1.2 Základní pojmy ¹	- 14 -
2 Vibrace.....	- 16 -
2.1 Příčiny vzniku vibrací	- 17 -
2.1.1 Nevyváženost	- 17 -
2.1.2 Nesouosost	- 20 -
2.1.3 Mechanické uvolnění	- 22 -
2.1.4 Rezonance	- 22 -
2.2 Snímače.....	- 22 -
2.2.1 Snímače výchylky	- 23 -
2.2.2 Snímače rychlostí	- 24 -
2.2.3 Snímače zrychlení – akcelerometry	- 24 -
2.2.4 Vhodné uchycení snímače.....	- 25 -
2.3 Klasifikace signálů.....	- 26 -
2.3.1 Frekvenční analýza pomocí FFT	- 27 -
2.3.2 Popis vibračního signálu	- 28 -
2.4 Zásady volby měřících míst.....	- 30 -
3 Termodiagnostika.....	- 31 -
3.1 Teplota	- 31 -
3.2 Kontaktní měření teploty	- 31 -
3.3 Bezkontaktní měření teploty	- 32 -
3.3.1 Termokamery	- 33 -
4 Diagnostika čerpadel a elektromotorů	- 36 -
4.1 Čerpadla.....	- 36 -

4.1.1	Hydrodynamická čerpadla radiální	- 36 -
4.1.2	Vibrace čerpadel.....	- 37 -
4.2	Elektromotory	- 38 -
4.2.1	Asynchronní indukční elektromotory	- 38 -
4.2.2	Vibrace elektromotorů ³⁴	- 39 -
5	Praktická část.....	- 40 -
5.1	Použité vybavení.....	- 40 -
5.1.1	Analyzátor ADASH VA4 PRO.....	- 40 -
5.1.2	Snímače vibrací.....	- 41 -
5.1.3	IR Termokamera FLUKE TiS55.....	- 43 -
5.2	Postup měření	- 43 -
5.2.1	Rozmístění snímačů	- 43 -
5.2.2	Postup vyhodnocení	- 44 -
5.3	Diagnostika čerpadel Warman 14-12 GG u VP4 a VP6.....	- 45 -
5.3.1	Diagnostika čerpadla Warman 14-12 GG u VP6.....	- 46 -
5.3.2	Diagnostika čerpadla Warman 14-12 GG u VP4.....	- 50 -
5.4	Diagnostika čerpadel Warman 300 PC-PG pro VP4 a VP6	- 52 -
5.4.1	Diagnostika čerpadla Warman 300 PC-PG pro VP6	- 53 -
5.4.2	Diagnostika čerpadla Warman 300 PC-PG pro VP4	- 56 -
5.5	Diagnostika vertikálních čerpadel Warman 200 SV-SP Č1 a Č2.....	- 57 -
	Závěr	- 63 -

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
B	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	Indukce magnetického pole
ε	-	Emisivita
f	Hz	Frekvence
ϕ	W	Zářivý tok
K_V	-	Činitel výkmitu
l	m	Délka
T	°C	Teplota
U	V	Elektromotorické napětí
v	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost
x_a	m	Amplituda harmonického kmitání
x_{ef}	-	Efektivní hodnota
x_{pp}	-	Rozkmit
$x_{stř}$	-	Střední hodnota
Ω	rad/s	Vlastní kruhová frekvence
φ	rad, °	Počáteční fázový úhel

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
COS	Centrální osa setrvačnosti
Č	Čerpadlovna
Č1,2	Čerpadlo 1,2
FFT	Rychlá Fourierová transformace (Fast Fourier transformation)
HD	Hydrodynamická čerpadla
HS	Hydrostatická čerpadla
OR	Osa rotace
P-P	Hodnota špička - špička (peak to peak)
PR	Proudová čerpadla
RMS	Efektivní hodnota (Root mean Square)
RPM	Otáčky za minutu (Revolutions per minute)
L1,2,3,4	Označení ložiska
A	Směr měření axiální
H	Směr měření horizontální
V	Směr měření vertikální
VP4	Vysoká pec 4
VP6	Vysoká pec 6

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 – Vývoj typů a nástrojů údržby ²	- 15 -
Obrázek 2.1 – Závislosti ovlivňující vibrace ⁴	- 16 -
Obrázek 2.2 – Statická nevyváženost ⁶	- 17 -
Obrázek 2.3 – Projev statické nevyváženosti ve frekvenčním spektru.....	- 18 -
Obrázek 2.4 – Momentová nevyváženost ⁶	- 18 -
Obrázek 2.5 – Projev momentové nevyváženosti ve frekvenčním spektru.....	- 19 -
Obrázek 2.6 – Dynamická nevyváženost ⁶	- 19 -
Obrázek 2.7 – Projev dynamické nevyváženosti ve frekvenčním spektru.....	- 20 -
Obrázek 2.8 – Rovnoběžná nesouosost ⁶	- 20 -
Obrázek 2.9 – Projev rovnoběžné nesouososti ve frekvenčním spektru.....	- 21 -
Obrázek 2.10 – Úhlová nesouosost ⁶	- 21 -
Obrázek 2.11 – Projev úhlové nesouososti ve frekvenčním spektru.....	- 21 -
Obrázek 2.12 – Projev mechanického uvolnění ve frekvenčním spektru.....	- 22 -
Obrázek 2.13 – Relativní a absolutní kmity ¹⁰	- 23 -
Obrázek 2.14 – Schéma snímače výchylky ¹¹	- 23 -
Obrázek 2.15 – Principiální uspořádání elektrodynamického snímače rychlosti ¹⁰	- 24 -
Obrázek 2.16 – Vliv uchycení snímače na použitelný frekvenční rozsah ¹²	- 26 -
Obrázek 2.17 – Metoda FFT ¹³	- 27 -
Obrázek 2.18 – Princip FFT ¹	- 28 -
Obrázek 2.19 – Popis měřeného signálu a jeho frekvenční spektrum ¹³	- 29 -
Obrázek 2.20 – Vanová křivka průběhu opotřebení ¹⁸	- 30 -
Obrázek 2.21 – Možnosti uložení snímače při měření vibrací ¹²	- 30 -
Obrázek 3.1 – Záření využívané pro bezdotykové měření teploty ²⁴	- 32 -
Obrázek 3.2 – Princip bezkontaktního měření teploty ²⁴	- 32 -
Obrázek 3.3 – Termografické měření ²⁷	- 33 -
Obrázek 3.4 – Stacionární termokamera FLIR AX8 ²⁹	- 34 -
Obrázek 3.5 – Ruční termokamera Fluke ³⁰	- 34 -
Obrázek 3.6 – Použití termokamery při diagnostice strojů ³¹	- 35 -
Obrázek 4.1 – Popis části radiálního čerpadla typu WARMAN 14-12 G-G ³³	- 37 -
Obrázek 4.2 – Popis asynchronního elektromotoru ³⁴	- 39 -

Obrázek 5.1 – Analyzátor vibrací ADASH A440 VA4 PRO ³⁶	- 41 -
Obrázek 5.2 – Softwarové rozhraní programu.....	- 41 -
Obrázek 5.3 – Akcelerometry AC102,104-1 A, HS 100 a MTN/2200SM6 ^{37,38,39,40}	- 42 -
Obrázek 5.4 – Rozmístění snímačů na měřeném zařízení	- 43 -
Obrázek 5.5 – Čerpadlo Warman 14–12 GG u VP6.....	- 45 -
Obrázek 5.6 – Čerpadlo Warman 14-12 GG u VP4	- 46 -
Obrázek 5.7 – Warman 14-12 GG u VP6	- 46 -
Obrázek 5.8 – Spektrum rychlosti vibrací ložiska L3-VP6 v axiálním směru	- 48 -
Obrázek 5.9 – Obálka spektra zrychlení vibrací ložiska L3-VP6 v axiálním směru.....	- 48 -
Obrázek 5.10 – Časové spektrum rychlosti vibrací ložiska L3 v horizontálním směru-	49 -
Obrázek 5.11 – Obálka spektra zrychlení vibrací ložiska L3-VP6 v horiz. směru.....	- 49 -
Obrázek 5.12 – Warman 14-12 GG u VP4	- 50 -
Obrázek 5.13 – Obálka spektra zrychlení ložiska L2-VP4 ve vertikálním směru.....	- 51 -
Obrázek 5.14 – Termosnímek motoru čerpadla Warman 14-12 GG u VP4.....	- 51 -
Obrázek 5.15 – Termosnímek ložiskového domku čerpadla Warman 14-12 GG u VP4-	52 -
Obrázek 5.16 – Diagnostikované čerpadlo Warman 300 PC-PG pro VP6 s gemexem .	- 53 -
Obrázek 5.17 – Diagnostikované čerpadlo Warman 300 PC-PG pro VP4.....	- 53 -
Obrázek 5.18 – Obálka zrychlení vibrací ve vertikálním směru pro ložisko L3-VP6-Č	- 54 -
Obrázek 5.19 – Termosnímek čerpadla Warman 300 PG-PC pro VP6.....	- 55 -
Obrázek 5.20 – Termosnímek motoru čerpadla Warman 300 PG-PC pro VP6	- 55 -
Obrázek 5.21 – Čerpadla Warman 200 SV-SP-Č1 a Č2	- 57 -
Obrázek 5.22 – Spektrum rychlosti vibrací v axiálním směru ložiska L1-Č-Č1	- 58 -
Obrázek 5.23 – Časové spektrum rychlosti vibrací v horiz. směru pro ložisko L2-Č-Č1-	59
-	
Obrázek 5.24 – Spektrum rychlosti vibrací v axiálním směru ložiska L2-Č-Č1	- 59 -
Obrázek 5.25 – Spektrum rychlosti vibrací ve vertikálním směru ložiska L1-Č-Č2.....	- 61 -
Obrázek 5.26 – Spektrum rychlosti vibrací ve vertikálním směru ložiska L2-Č-Č2.....	- 61 -

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 – Porovnání jednotlivých snímačů zrychlení ¹¹	- 25 -
Tabulka 3.1 – Tabulka emisivit dle druhu materiálu ²⁶	- 33 -
Tabulka 5.1 – Doporučené hodnoty rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz	- 44 -
Tabulka 5.2 – Doporučené hodnoty zrychlení vibrací v pásmu 500-25k Hz	- 44 -
Tabulka 5.3 – Výsledné zhodnocení technického stavu zařízení	- 44 -
Tabulka 5.4 – Klasifikace přístrojů do jednotlivých stupňů dle naměřených teplot	- 45 -
Tabulka 5.5 – Naměřené hodnoty vibrací na čerpadle Warman 14-12 GG u VP6	- 47 -
Tabulka 5.6 – Naměřené hodnoty vibrací na čerpadle Warman 14-12 GG u VP4	- 50 -
Tabulka 5.7 – Hodnoty termosnímku zařízení Warman 14-12 GG u VP4.....	- 52 -
Tabulka 5.8 – Naměřené hodnoty vibrací na čerpadle Warman 300 PC-PG pro VP6...	- 54 -
Tabulka 5.9 - Hodnoty termosnímku zařízení Warman 300 PG-PC pro VP6.....	- 55 -
Tabulka 5.10 – Naměřené hodnoty vibrací na čerpadle Warman 300 PC-PG pro VP4. -	- 56 -
Tabulka 5.11 – Naměřené hodnoty vibrací pro čerpadlo Warman 200 SV-SP-C1	- 58 -
Tabulka 5.12 – Naměřené hodnoty vibrací pro čerpadlo Warman 200 SV-SP-C2	- 60 -

Úvod

V těžkém průmyslu se neustále setkáváme s nežádoucími jevy, které ovlivňují životnost přístrojů. Hodnocení technického stavu a jeho následná údržba jsou důležitými kroky k zlepšení spolehlivosti a bezpečnosti provozu. Technická zařízení je nutné kontrolovat a sledovat v určitých předem stanovených intervalech, aby se předešlo vzniku technických poruch a havárii. Jednou z hlavních používaných nedestruktivních metod zajištění technického stavu zařízení je vibrační diagnostika. Výsledné hodnoty a údaje, zjištěné touto diagnostickou metodou, jsou následně analyzovány a výstupem je zpracovaná diagnostická zpráva s nápravnými kroky. Tato práce je zaměřená především na vibrodiagnostiku vodních čerpadel a elektromotorů firmy Třinecké železářny a.s. Pomocí této metody je vyhodnocen technický stav zařízení, který je v praxi důležitý pro výsledné určení životnosti stroje, míry vibrace a hluku. S touto metodou je obvykle kombinováno i měření otáček, teploty a zhodnocení různých vlivů okolí, které nejenže ovlivňují provoz zařízení, ale taky mohou nepříznivě působit na člověka.

1 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika je jednou z metod technické diagnostiky a její úlohou je určit technický stav zařízení bez jeho demontáže. Vibrodiagnostika je založena na měření a analýze vibračních signálů. Jedná se o prioritní diagnostiku, která zaznamenala obrovský průlom ve výrobě. Aplikace vibrodiagnostiky umožňuje zvýšení bezpečnosti a efektivnosti výroby. Hodnoceno je mechanické kmitání, které je měřeno na statických, ale i pohyblivých částech zařízení. Na základě zpracování signálu a jeho diagnostiky je možné identifikovat chyby bez přerušení provozu a včas analyzovat možné nebo začínající škody, což se jeví jako jedna z hlavních výhod vibrodiagnostiky.

1.1 Historický vývoj vibrodiagnostiky

Vibrodiagnostika je jeden článek metody technické diagnostiky. Od samého počátku tato metoda byla analyzována na základě vizuálních a pocitových vjemů, které se časem dostaly až k použití nejmodernější měřicí techniky, která má vypovídající schopnosti o technickém stavu objektu který je sledován. Průlomem této metody je zapojení výpočetní techniky do procesu měření, které umožňovalo v oblasti vibrodiagnostiky nejen měřit signály, ale taky je vyhodnotit v reálném čase. Tento pokrok zpřesnil měření výsledků, což je v praxi neocenitelný přínos jak po technické, tak i ekonomické stránce ¹.

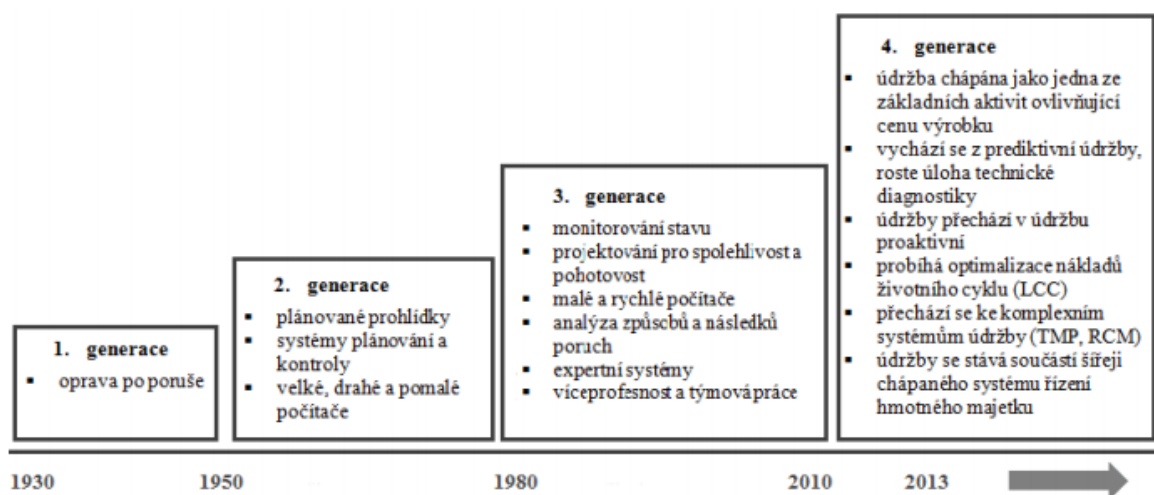
1.2 Základní pojmy¹

Cílem sledování vibrací rotujících strojů je poskytování informace o technickém stavu za účelem řízení údržby. Vibrodiagnostika je jednou z odvětví technické diagnostiky strojů a zařízení se kterým je spjata mnoho pojmů a vlivů souvisejících s tímto procesem. Níže jsou představeny základní pojmy technické diagnostiky, které jsou určeny k lepší orientaci v dané problematice.

- **Údržba** – patří mezi základní provozní činnosti, které mají za cíl udržovat a zachovávat funkce, a užité hodnoty strojů, zařízení či infrastruktury.
 - **Určení počátečního stavu** – proměření strojního zařízení před prvotním uvedením do provozu a stanovení referenčních hodnot pro následná pozorování. Základní údaje a hodnoty uvádí výrobce zařízení.
 - **Monitorování** – sledování efektivity a provozních stavů strojního zařízení v pravidelných intervalech. Sledovány jsou parametry vibrace, hluku, teploty a další.
 - **Detekce** – určení limitních hodnot pro měřené veličiny, pokud dojde k jejich překročení pak je toto upozornění k možnému výskytu vady či jeho iniciace.

Vibrodiagnostika

- **Analýza** – detailní analýza naměřených dat, která určuje podrobný popis daného problému. Jedna z používaných analýz je FFT analýza, která bude zmíněna v jednom z bodů práce.
- **Objekt** – neboli cíl pozornosti, systém nebo přístroj, kterým se individuálně zabýváme.
- **Bezporuchovost** – způsobilost výrobku plnit požadované funkce bez poruchy po stanovenou dobu a za stanovených podmínek.
- **Porucha** – částečná nebo úplná ztráta vlastností výrobku, která podstatným způsobem snižuje schopnosti výrobku plnit požadovanou funkci.
- **Diagnostika** – zkoumání technického stavu sledovaného objektu bez demontáže.
 - **Diagnóza** – analýza technického stavu a vyhodnocení objektu za daných provozních podmínek. Detekce vznikající poruchy a lokalizace místa vadné části. Dalším postupem je specifikace poruchy a určení zbytkové životnosti.
 - **Geneze** – analýza důvodů vady nebo poruchy, která zhoršuje stav objektu.
 - **Prognóza** – vývoj technického stavu objektu a plánování jeho dalších oprav.
- **Měření** – umožňuje diagnostikovat technický objekt.
 - **Online měření** – diagnostika stavu objektu přímo v provozu. Měříme-li periodicky nebo trvale mluvíme o tzv. monitorování.
 - **Offline měření** – diagnostika objektu který není v provozu. Vyhodnocení naměřených dat probíhá s časových odstupem na jiném pracovišti, než kde probíhalo monitorování.



Obrázek 1.1 – Vývoj typů a nástrojů údržby ².

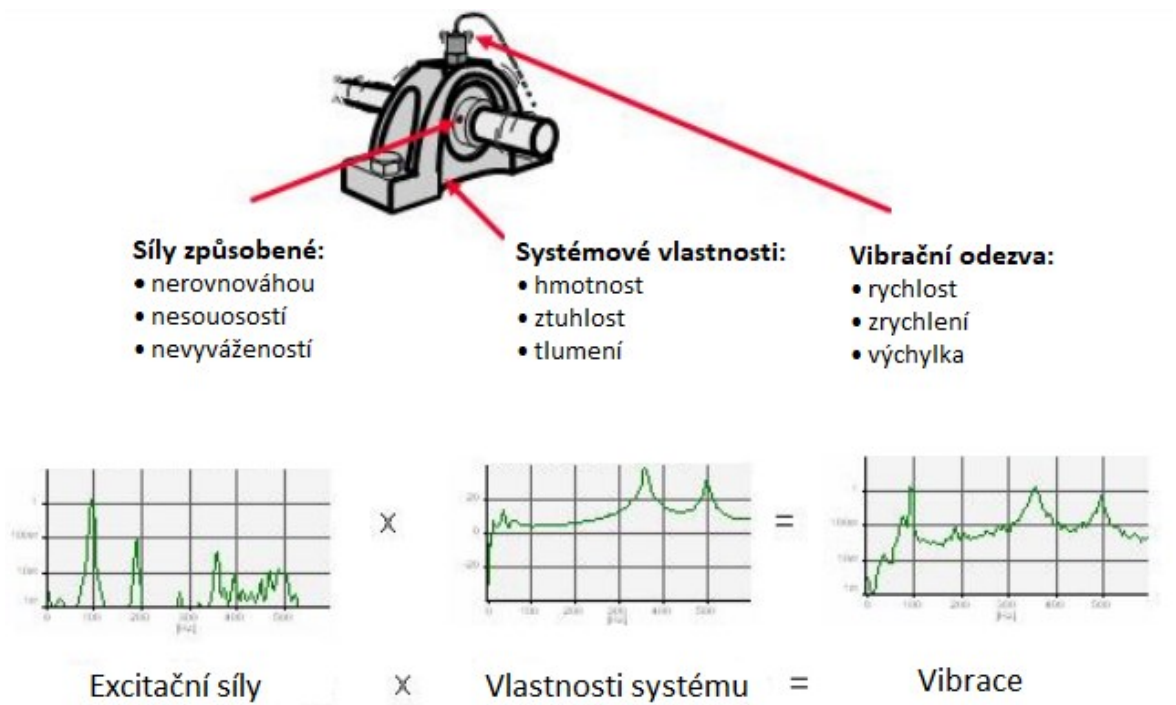
2 Vibrace

K určení objektivního technického stavu rotujících strojů se ve vibrodiagnostice využívá jako diagnostický parametr vibrace. Mechanický kmitočet je jednou z doprovázejících jevů všech typů strojů, které jsou vázané na rotující pohyb. Analýza vibrační odezvy se systémem senzorů může určit charakter budící síly a taky příčinu poruchy stroje.

Nejčastější detekovatelné závady zvyšující vibrace u všech typu strojů jsou^{1,3}:

- dynamické namáhání stroje,
- technický stav ložisek, hřídelí a převodovek,
- nevyváženost rotujících součástí,
- hydraulické a aerodynamické problémy,
- nesouosost,
- vůle u pohybových částí,
- styk třecích ploch,
- střet navzájem dotýkajících se dvou nebo více těles apod.

Základním problémem aplikace každého druhu diagnostiky je fakt, že analyzujeme až odezvu na působící příčiny, které jsou podstatné pro stanovení způsobu opravy. V případě vibrační diagnostiky jsou touto odezvou vibrace, jejichž charakter závisí na druhu působící síly.



Obrázek 2.1 – Závislosti ovlivňující vibrace⁴.

2.1 Příčiny vzniku vibrací

V praxi je velmi obtížné se vibracím vyhnout. K vibracím obvykle dochází z důvodu dynamických účinků výrobních tolerancí, vůlí, odvalovacího a třecího kontaktu mezi částmi stroje a nevyváženými silami v rotujících a vratných částech. Malé nepatrné vibrace mohou často excitovat rezonanční kmitočty některých jiných konstrukčních částí a mohou být zesíleny do hlavních zdrojů vibrací a hluku. Je-li úroveň vibrace pod 2 mm/s pak síly vyvolané vibracemi nemají vliv na poruchu přístroje nebo životnost ložiska. Přesáhnutím úrovně 2 mm/s může být poruchovost některých částí přístroje kritická. Příčiny vzniku vibrací jsou hlavně nevyváženost, nesouosost, mechanické uvolnění a rezonance, proto budou představeny v dalších částech kapitoly ⁵.

V této kapitole jsou uvedeny základní příčiny vzniku vibrací ^{1,6}.

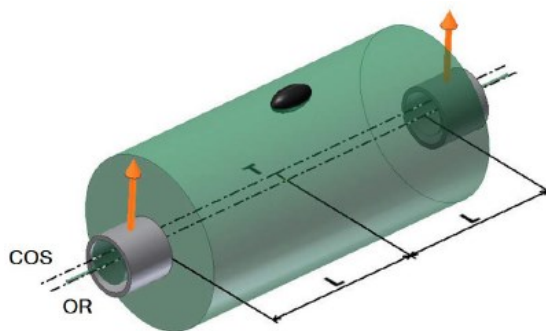
2.1.1 Nevyváženost

Nevyváženost způsobuje vznik mechanického kmitání, které má za následek velké namáhání celého stroje. V praxi tento následek představuje razantní zkrácení životnosti strojních zařízení. Příčiny nevyváženosti jsou například nevyváženost osy setrvačnosti s osou rotace, nevyváženost hmotnosti rotujícího tělesa, deformace součástí, nerovnoměrné opotřebení rotoru a mnoho dalších, které způsobují vibrace stroje.

Nevyváženost lze rozdělit podle nevyváhy po délce rotoru na tři druhy.

a) Statická nevyváženost

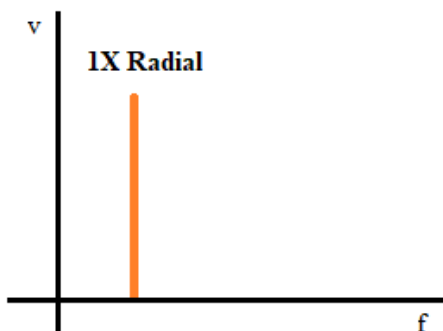
S touto nevyvážeností se nejčastěji setkáváme u rotujících kotoučů, kde průměr kotouče je podstatně větší než jeho šířka. Nevyváženost může být způsobena nevyvážením dvou protilehlých bodů, které mají za následek vibraci a případné tření se sousedními částmi stroje. Řešením tohoto problému je odebrání nebo přidání materiálu v místě nevyváhy. Jelikož u statické nevyváženosti působí pouze jedna síla, můžeme tento jev pozorovat v klidu, položíme-li rotor na plochu a nejtěžší bod zaujme nejnižší polohu.



Obrázek 2.2 – Statická nevyváženost ⁶.

Obrázek 2.2 popisuje statickou nevyváženost, která má paralelně posunutou centrální osu setrvačnosti (COS) oproti osy rotace (OR). Průběhy os jsou vůči sebe rovnoběžné ⁸.

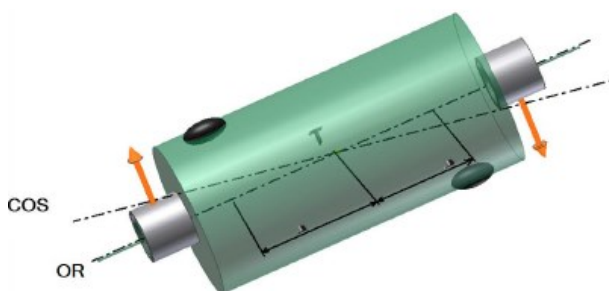
Statická nevyváženost bude ve fázi a ustálená. V důsledku této nevyváženosti se bude amplituda zvětšovat se čtvercem otáčkové frekvence pod první kritickou otáčkovou frekvencí rotoru (2x vyšší otáčky → 4x větší amplituda 1X). Ve spektru je dominantní vždy přítomná první harmonická složka signálu 1X. V horizontálním a vertikálním směru musí být mezi vibracemi přibližně nulový rozdíl fází. V praxi se téměř nevyskytuje. Převládá chvění v radiálním směru ⁹.



Obrázek 2.3 – Projev statické nevyváženosti ve frekvenčním spektru

b) Momentová nevyváženost

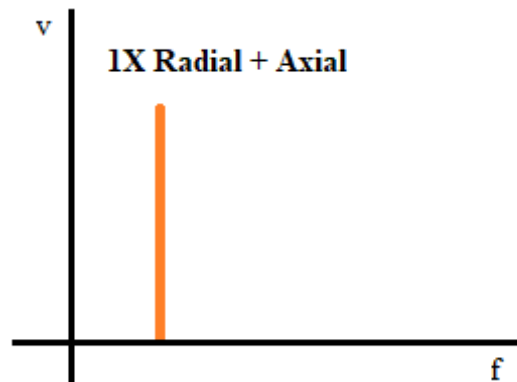
U momentové nevyváženosti působí dvě totožné síly proti sobě, proto tento jev nemůžeme zaznamenat v klidové poloze. Při otáčení tyto síly na obou koncích hřídele posunují rotor do opačného směru, který následně vibruje a hodnoty fáze jsou posunuty o 180 °. Tyto vibrace způsobují nechtěné namáhání stroje.



Obrázek 2.4 – Momentová nevyváženost ⁶.

Na obrázku 2.4 je znázorněna osa rotace (OR) a centrální osa setrvačnosti (COS), které jsou u momentové nevyváženosti vůči sebe různoběžné. Osa setrvačnosti svírá s osou rotace určitý úhel a protínají se v ose těžiště rotoru ⁸.

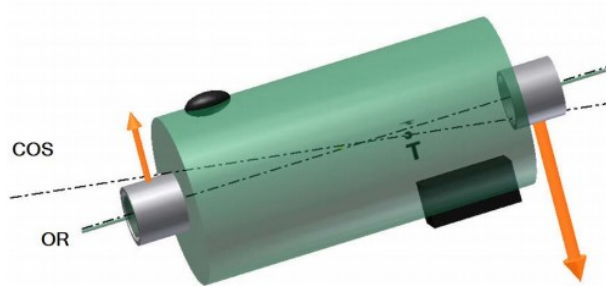
U tohoto typu nevyváženosti je vždy ve spektru přítomná složka 1X RPM. Amplituda se zvětšuje se čtvercem otáčkové frekvence, stejně jak u statické nevyváženosti. Může způsobit vysoké axiální vibrace zároveň s radiálními ⁹.



Obrázek 2.5 – Projev momentové nevyváženosti ve frekvenčním spektru

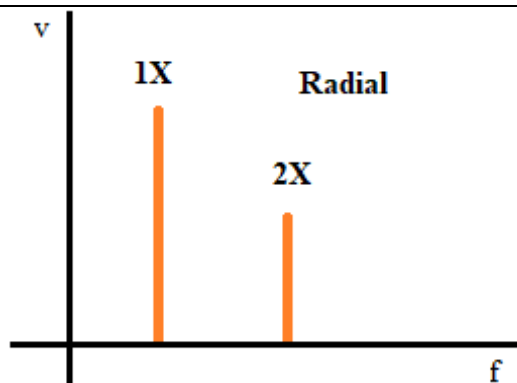
c) Dynamická nevyváženost

Tato nevyváženost je způsobená jak statickou, tak i momentovou nevyvážeností. Hlavní osa setrvačnosti neprotíná osu rotace v těžišti, ale k protnutí dochází mimo těžiště (viz. Obrázek 2.6). V praxi při vyvažování stroje se vyvažuje nejdříve statická a pak až momentová nevyváženost. U jednoduchých strojů se setkáme častěji se statickou nevyvážeností, oproti složitějším strojům, kde převládá nevyváženost momentová.



Obrázek 2.6 – Dynamická nevyváženost ⁶.

Ve spektru je dominantní amplituda otáčkové frekvence 1X RPM. Pro korigování jsou potřeba dvě roviny. Fázový rozdíl mezi horizontálními vibracemi na vnějším a vnitřním ložisku může být jakýkoli od 0 ° do 180°. Rozdíl fází v horizontálním a vertikálním směru souhlasí při porovnání měření na vnějším a vnitřním ložisku. Tato nevyváženost může způsobit nelinearitu a výskyt amplitudy s dvojnásobnou frekvencí 2X ⁹.



Obrázek 2.7 – Projev dynamické nevyváženosti ve frekvenčním spektru

2.1.2 Nesouosost

Velká část strojních zařízení používá spojky pro mechanické spojení hřídeli, díky kterým je přenášen točivý moment. Při tomto spojování se musí dbát na přesnou souosost, tak aby nedocházelo k tepelnému a silovému namáhání spojky a následně k deformaci hřídele, který způsobuje vibrace. Při nesplnění předpokladu správného ustavení, vznikají během provozu síly a kmity, které vyvolávají případná zatížení hřídelů, spojek a ložisek. Těmto zatížením se dá předcházet správným nastavením a vyrovnaním nesouososti, která během provozu nastala. Cílem je tedy zajistit souosost, při které osa rotace stacionárního stroje a osa rotace pohyblivého stroje tvoří jednu přímku. Níže budou představeny nesouososti, které tuto jednu přímku netvoří.

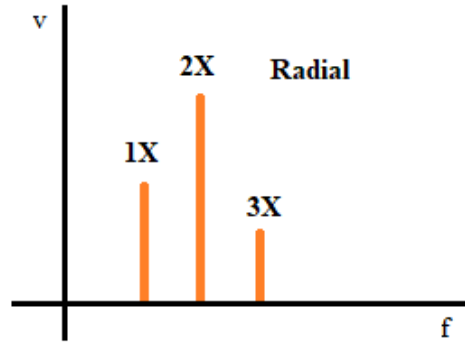
a) Rovnoběžná nesouosost

Při této nesouososti, osa rotace stacionárního stroje a osa rotace pohyblivého stroje tvoří navzájem dvě rovnoběžné přímky. Projevem jsou velké radiální vibrace.



Obrázek 2.8 – Rovnoběžná nesouosost ⁶.

Charakteristické pro spektrum této nesouososti je druhá harmonická složka 2X která bývá větší než složka 1X. V případě výrazné rovnoběžné nesouososti se můžou ve spektru objevovat amplitudové špičky na řadě harmonických násobků. Velikost 2X je ovlivněna typem a konstrukcí spojky a může ovlivnit průběh celého spektra ⁹.



Obrázek 2.9 – Projev rovnoběžné nesouososti ve frekvenčním spektru

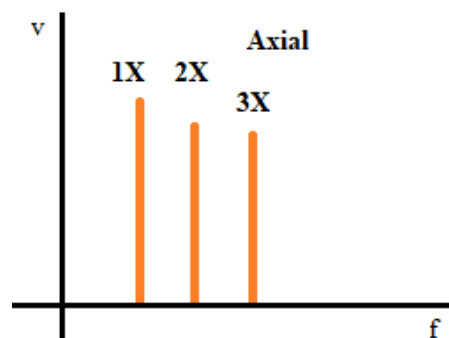
b) Úhlová nesouosost

V tomto případě osa rotace stacionárního stroje a osa rotace pohyblivého stroje tvoří navzájem dvě různoběžky, mezi kterými vzniká určitý úhel sklonu. Tato nesouosost způsobuje velké axiální vibrace.



Obrázek 2.10 – Úhlová nesouosost ⁶.

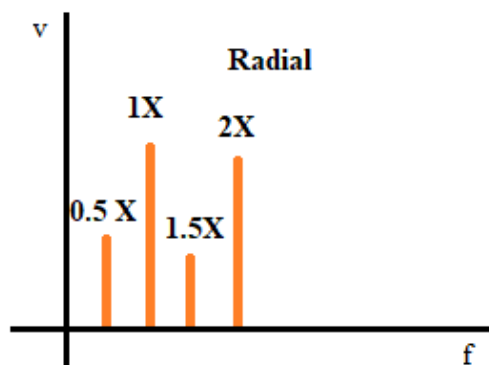
Projevem této nesouososti jsou velké axiální vibrace na složkách 1X a 2X RPM. Tyto symptomy mohou identifikovat i přítomnost problémů se spojkou. U výrazné úhlové nesouososti se objevuje mnoho harmonických násobků otáčkové frekvence 1X s vyskytující se občas větší amplitudou vibrací na volném konci ⁹.



Obrázek 2.11 – Projev úhlové nesouososti ve frekvenčním spektru

2.1.3 Mechanické uvolnění

Vlivem opotřebení spoje, chybnou montáží nebo nekvalitní konstrukcí může dojít k uvolnění základny od podložky. Postupnou ztrátou pevnosti tak dochází k ovlivnění nebo dokonce i ke zvýšení měřených vibrací stroje. Signál vibrací je periodický a blízký obdélníkovému, obecně se projevuje jako dlouhý sled neobvykle vysokých amplitud vyšších harmonických složek, subharmonických složek a interharmonických složek. Tento zdroj vibrací má nežádoucí efekt na identifikaci jiných zdrojů vibrací.



Obrázek 2.12 – Projev mechanického uvolnění ve frekvenčním spektru

Mechanické uvolnění může být projevem výrazných 1X a 2X otáčkových frekvencí a menších 0,5X a 1,5X otáčkových frekvencí. V případě uvolněného základu je fáze mezi těmito objekty 180 °. U prasklého rámu můžou být amplitudy a fáze chaotické ⁹.

2.1.4 Rezonance

Rezonance je hlavním zdrojem zesílení vibrace stroje. Pokud je soustava, která kmitá vlastní frekvencí vystavená vibracím o stejné frekvenci, pak dochází k přetlaku vnitřní energie, soustava zvyšuje vibrace a dochází k rezonanci. Dojde k výraznému zvětšení vibrace a hlučnosti stroje. Rovnováhu soustavy udržuje pouze tlumení, jinak by došlo k destrukci.

Většina strojních součástí, strojů a zařízení dle své tuhosti a hmotnosti jsou jinak citlivé na různé rezonanční frekvence. Tyto rezonance jsou experimentálními postupy zjišťovány tak, že otáčky stroje jsou zvyšovány a současně zjišťovány jsou vibrace v různých směrech.

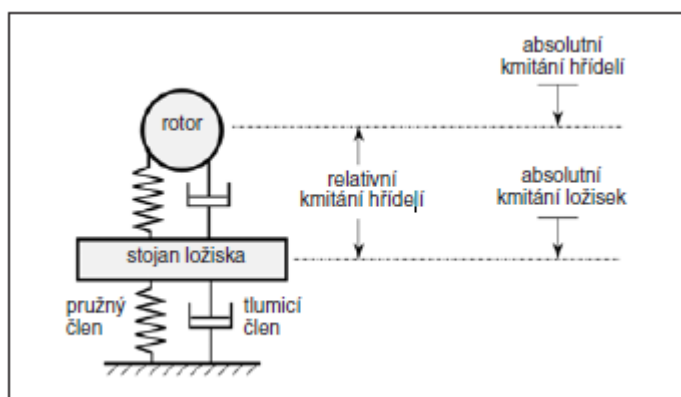
Na základě naměřených údajů upravujeme provozní otáčky stroje tak aby měly odstup od rezonanční frekvence minimálně o 30 %.

2.2 Snímače

Se správným snímačem, který poskytuje důležité provozní informace, je provoz zařízení bezpečnější jak pro stroj, tak i pro personál, který jej obsluhuje. Stroje jsou provozovány v různých provozních podmínkách, které mohou zahrnovat teplotní extrémy, magnetická pole, různé rozsahy vibrací a frekvencí, proto je vhodné používat snímače různých typů.

Vibrace

Vibrodiagnostika rozděluje snímače podle typu měřené veličiny na snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. Správný výběr snímače záleží od toho, jestli se jedná o vibrace relativní či absolutní. U absolutních vibrací popisujeme pohyb sledovaného stroje nebo zařízení vzhledem k Zemi, u relativních vibrací měříme pohyb stroje nebo zařízení k uměle vytvořené nebo vhodně zvolené základně. Touto zvolenou základnou je zpravidla volen rám stroje nebo zařízení. Mechanické kmitání je určeno vedle frekvence také společně výchylkou, rychlostí a zrychlením ¹⁰.

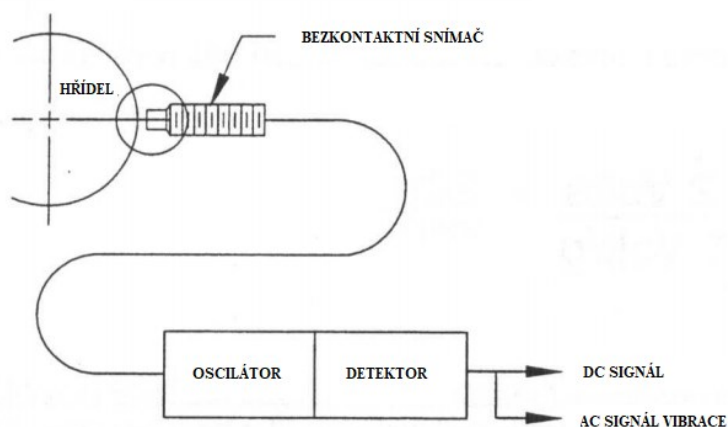


Obrázek 2.13 – Relativní a absolutní kmity ¹⁰.

2.2.1 Snímače výchylky

Pracují na principu indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém nebo optickém. Ve vibrodiagnostice jsou v dnešní době nejpoužívanější indukčnostní, které využívají závislost indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Jde o snímače velmi citlivé na parazitní vlivy, jako jsou například délka kabelu nebo vnější elektromagnetická pole vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu. Proto se vyrábějí jako integrované, kde kovový stínící kryt obsahuje dohromady s cívkou i základní část elektroniky.

V dnešní době se už i často používají bezdotykové optické snímače výchylky, které sice neovlivňují měřený objekt, ale způsobují několik dalších zdrojů nejistot.



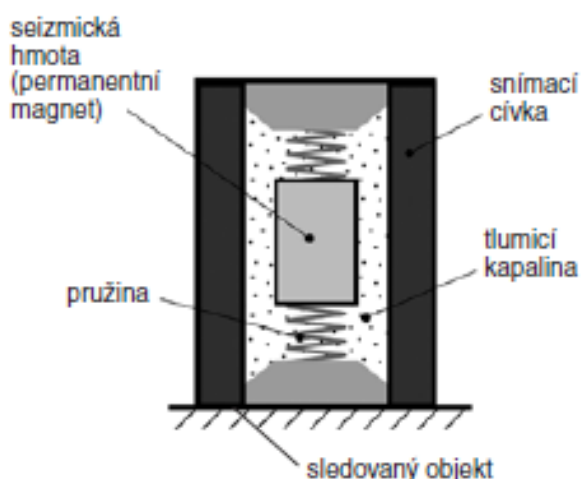
Obrázek 2.14 – Schéma snímače výchylky ¹¹.

2.2.2 Snímače rychlostí

Jde o ukázkový příklad snímání vibrací, protože jeho elektrodynamický princip byl již v minulosti vcelku snadno realizovatelný. Pohyb měřicí cívky se přímo pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu, který tvoří seizmickou hmotu snímače. Elektromotorická síla (U) se indukuje na sledovaném zařízení při kmitavém pohybu v cívce.

$$U = B \cdot l \cdot v, \quad (2.1)$$

, kde B je indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře snímače, l je délka vodiče cívky, v je rychlost kmitání pouzdra snímače ¹⁰.



Obrázek 2.15 – Principiální uspořádání elektrodynamického snímače rychlosti ¹⁰.

Elektrodynamický snímač (obrázek 2.15) je absolutním snímačem amplitudy kmitavého pohybu, který vyhodnocuje rychlost kmitání pouzdra díky svému vnitřnímu uspořádání. Snímače tohoto typu pracují na frekvenci v rozmezí od 5 až 10 Hz. Při vhodném nastavení tlumení lze s jistou chybou měřit kmitavý pohyb od určité frekvence, případně při použití korekce charakteristiky lze měřit od 1 Hz. Elektrodynamické snímače disponují velmi velkou zásobou předností, avšak je limituje horní hranice použitelnosti do frekvence 3,5 kHz spolu s velkou citlivostí na magnetické pole, co způsobuje velmi výrazné zdroje určitých nejistot. V současnosti se s těmito snímači setkáváme už jenom zřídka a rychlost kmitavého pohybu se určuje integrací signálu z akcelerometrů ^{1,10}.

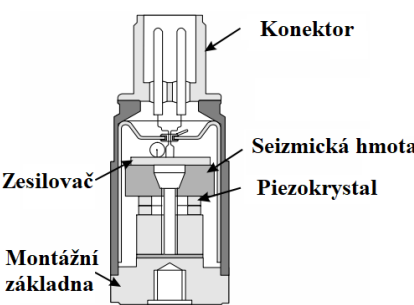
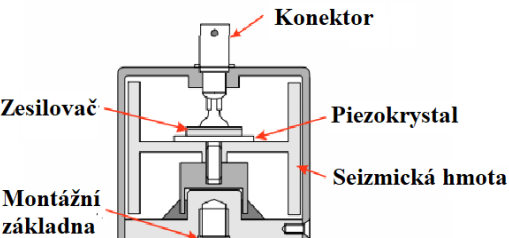
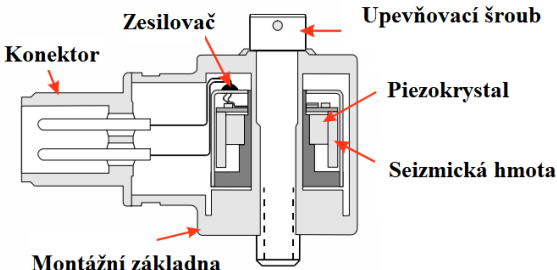
2.2.3 Snímače zrychlení – akcelerometry

V praxi je nejvíce používaný snímač zrychlení, který využívá ke snímání pohybu seizmické hmoty piezoelektrický jev. Jde o absolutní snímač kmitání. Konstrukčně jsou tyto piezoelektrické snímače řešeny často se smykovým namáháním piezokrystalu, nebo méně častým tlakovým namáháním. Konstrukčně často používaný typ snímače je Delta Shear®, který má tři dvojice piezokrystalů a setrvačné hmoty, které jsou upevněné na trojbokém středovém sloupku, a zaručují jeho linearitu.

Vibrace

Tyto snímače se vyznačují velkou citlivostí, malou hmotností a vysokou frekvencí. Velkou předností je také oddělení základního snímače od vlastního snímacího mechanismu¹⁰.

Tabulka 2.1 – Porovnání jednotlivých snímačů zrychlení¹¹.

Druh	Popis	+	-
Tlakový		Odolný na rázy, široký rozsah	Velký teplotní vliv
Ohybový		Vysoká citlivost	Citlivý na rázy
Smykový		Nízký teplotní vliv	Menší citlivost

2.2.4 Vhodné uchycení snímače

Ve vibrodiagnostické praxi se nejvíce setkáváme s akcelerometry. Jejich uchycení na diagnostikovaný objekt je významnou problémovou oblastí, a tedy i zdrojem nejistot. Připevňovací charakteristiky a doporučené připevnění snímačů je většinou uváděno výrobcem. Důraz je kladen především na úzký mechanický kontakt mezi základnou akcelerometru a povrchem, ke kterému je snímač připevněn. Frekvenční rozsah může ovlivnit způsob upevnění snímače a tím i znehodnotit dané měření. Níže jsou zmíněné základní způsoby upevnění snímače.

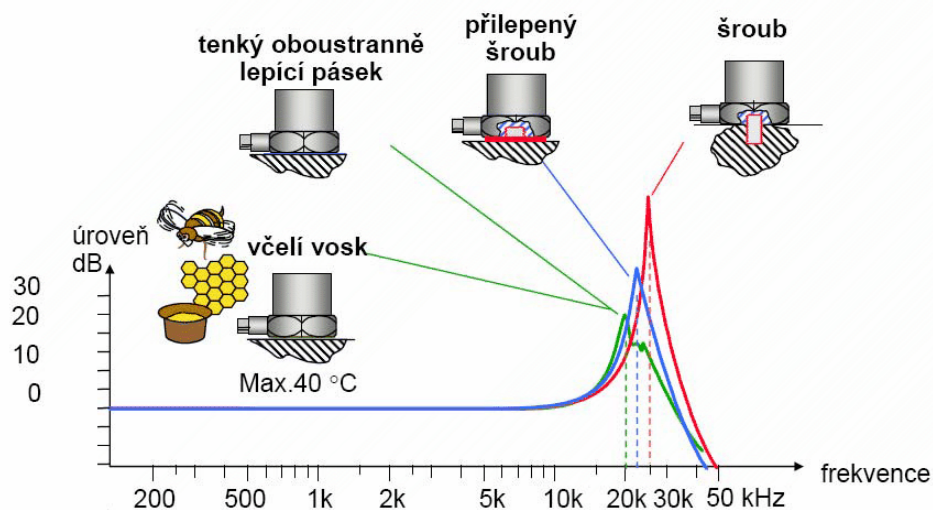
Piezelektrické akcelerometry mají obvykle použitelné frekvenční pásmo od několika málo hertzů do 20 až 40 kHz. Upevníme-li snímač závrtnými šrouby, pak lze dosáhnout nejmenšího ovlivnění frekvenční charakteristiky a maximálního využití frekvenčního rozsahu. Pro případné vylepšení můžeme také aplikovat tenkou vrstvou silikonové vazelíny mezi styčné plochy.

Vibrace

Velmi dobrého rozsahu frekvencí se dá dosáhnout také připevněním speciálními lepidly nebo včelím voskem, musíme však myslet na to, že jeho použití je teplotně omezeno.

Často používaný je taky zubní cement nebo kyanoakrylátové lepidlo, které udržuje snímač adhezí silou. Jeho hlavní výhodou je bezproblémové sejmutí snímače z daného místa bez jeho poškození.

K nejproblémovějším uchycením patří snímače s ručním hrotem nebo magnetickou příchytkou, které však mají svůj nezastupitelný význam při hledání vhodného měřicího místa. Vhodná volba měřicího místa je obzvláště důležitá u absolutních snímačů, kde nesmí docházet vlivem tuhosti a pružnosti přístroje ke zkreslení měření chvěním nebo frekvencemi^{1,10,12}.



Obrázek 2.16 – Vliv uchycení snímače na použitelný frekvenční rozsah¹².

2.3 Klasifikace signálů

Signály jsou fyzikální veličiny, které přenášejí určité množství informace. Jsou reprezentovány pojmem závislosti jednoho parametru na druhém, kde jako nezávislá proměnná se používá většinou čas.

Tyto signály z hlediska obecného rozdělení dělíme na:

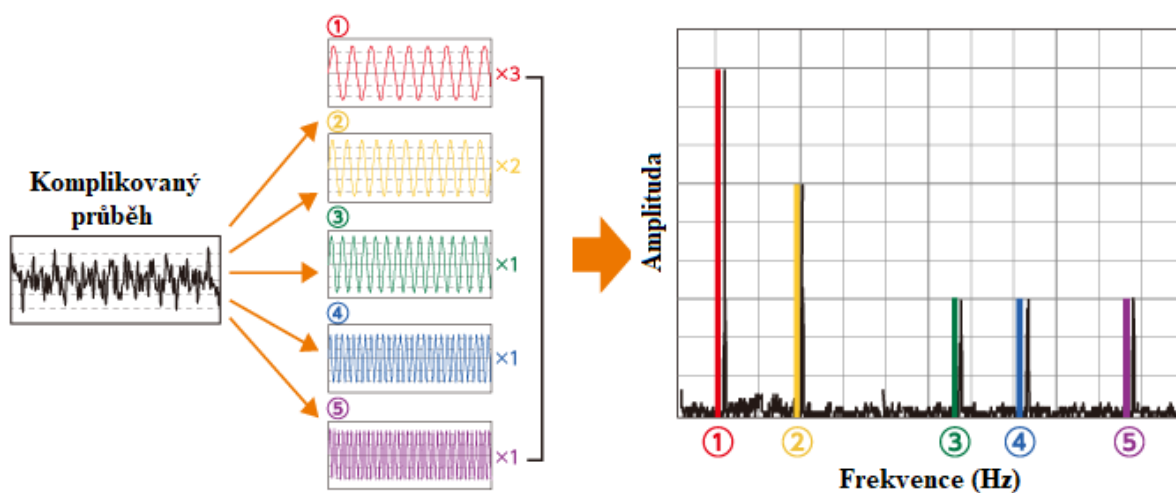
- **Deterministický signál** – signál, který můžeme popsat a jeho průběh předpovídat, hodnoty jsou v daném čase jednoznačně určeny.
 - **Přechodný** – signál časově omezen, impulsní odezva.
 - **Periodický** – je složen z harmonických signálů, které jsou násobkem jedné základní frekvence (má široké uplatnění v oboru kmitání).
 - **Kvasiperiodický** – signál složený z harmonických signálů s frekvencemi, které jsou násobkem alespoň dvou základních frekvencí se vzájemným poměrem velikosti, která je rovna iracionálnímu číslu.

- **Stochastický signál** – náhodný signál, který má nepředvídatelný vývoj průběhu, jeho hodnoty jsou náhodné. Takovýto signál můžeme nazvat šumem.
 - **Stacionární a nestacionární signál** – stacionární signál má v čase neměnné statistické vlastnosti. Nestacionární signál se v čase mění. Důležitá je délka záznamu signálu, která se v průběhu může změnit z nestacionárního na stacionární nebo naopak.

Náhodné signály můžeme dělit také na širokopásmové a úzkopásmové. Úzkopásmový signál obsahuje jednu náhodnou frekvenci s měnící se amplitudou, širokopásmový je složen z harmonických signálů z širokého pásma frekvencí. Náhodný signál je taky často označován jako šum. V strojním průmyslu se nejčastěji setkáváme s periodickými signály¹.

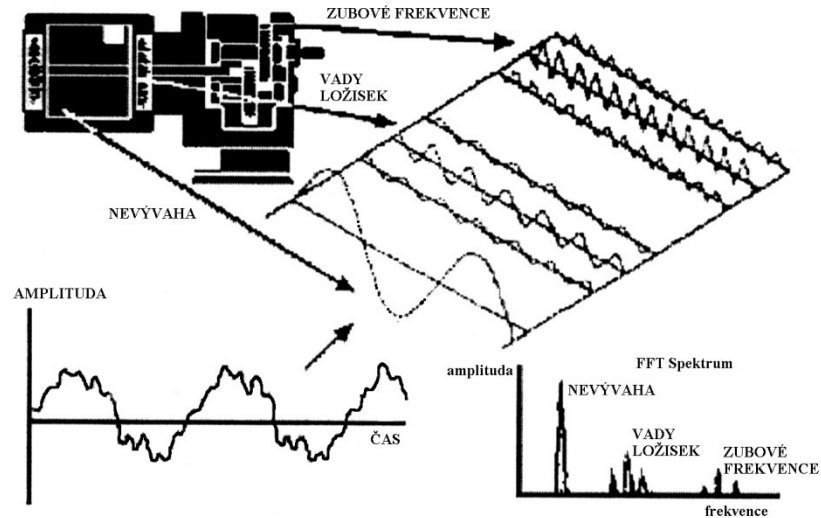
2.3.1 Frekvenční analýza pomocí FFT

Frekvenční analýza pomocí FFT je jedna ze základních analytických metod, která v průběhu měřeného vibračního signálu hledá pravidelně se opakující děje. Periodické děje jsou pak zobrazeny v daném souřadnicovém systému. Souřadnicové systémy jsou frekvenční nebo časové. Ve frekvenčním spektru popisujeme amplitudu (na ose y) a frekvenci (na ose x). Časový průběh popisujeme jako závislost amplitudy na čase.



Obrázek 2.17 – Metoda FFT¹³

Rozložením periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických funkcí vytvoříme tzv. Fourierovu řadu. Frekvenčním rozkladem je periodická funkce rozložena na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a počáteční fází. FFT (Fast Fourier Transformation) se používá pro obecné neperiodické funkce. Z Fourierovy řady a FFT můžeme tedy vytvořit komplexní informace o technickém stavu a možných příčinách jeho zhoršení.

Obrázek 2.18 – Princip FFT ¹.

FFT je nejrozšířenějším způsobem stanovení frekvenčního spektra, díky své rychlosti, přesnosti a jednoduchosti při nastavení parametrů. Jeho analýza pak dále umožňuje zjistit maximum informací daného signálu, které můžeme uložit v obrazové nebo textové formě. Pro urychlení výpočtů FFT vycházejícího z Fourierovy řady je zásadní zvláštní volba délky záznamu ¹.

Obrázek 2.18 zjednodušeně popisuje princip FFT, kde vidíme časový signál, který je výsledkem složení signálu nevyváhy, vady ložisek a zubové frekvence.

Harmonický signál je většinou způsoben nevyváhou s největší amplitudou, zatímco signál způsobený vadou ložiska a zubovou frekvencí má malou amplitudu s několikrát násobně větší frekvencí než u nevyváhy. To znamená, že nevyváženost za jednu otáčku hřídele způsobí jednu harmonickou vibrační periodu, zatímco u vady ložiska dojde za jednu vibrační periodu k několikanásobným vibračním dějům. Díky těmto rozdílným frekvencím můžeme přibližně určit, o jakou vadu se jedná ¹⁴.

2.3.2 Popis vibračního signálu

Harmonický kmitavý pohyb, u kterého zanedbáme tlumení, lze popsat jako sinusový průběh s amplitudou ¹⁵:

$$x(t) = x_a \cdot \sin(\Omega t - \varphi), \quad (2.2)$$

kde x_a je amplituda harmonického kmitání, Ω je vlastní kruhová frekvence a φ je počáteční fázový úhel.

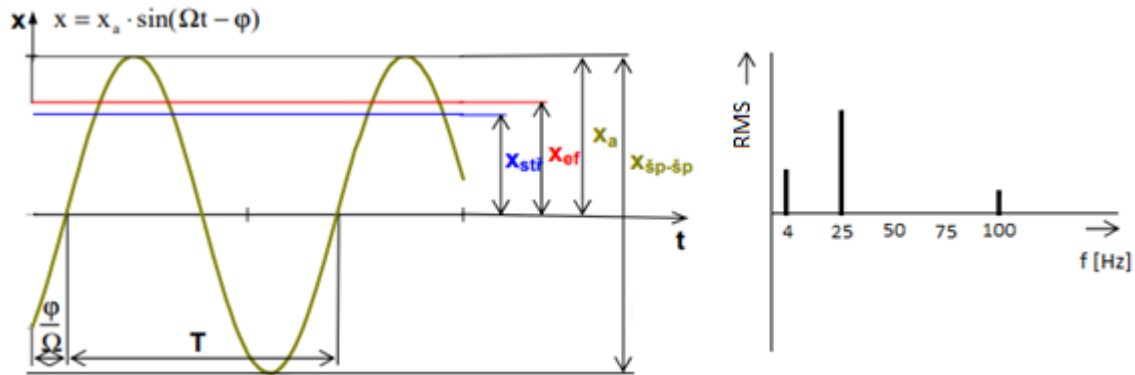
V technické praxi je nejvíce používaný termín frekvence, vyjádřená v hertzech neboli počet cyklů za sekundu.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.3)$$

Vibrace

Při detekci příčiny problému u mechanického systému, jsou používány k hodnocení veličiny jako:

- Efektivní hodnota (RMS – Root Mean Square) $x_{ef} = 0,707 \cdot x_a$
- Střední hodnota $x_{stř} = 0,637 \cdot x_a$
- Rozkmit (p-p – hodnota peak to peak) $x_{pp} = 2 \cdot x_a$



Obrázek 2.19 – Popis měřeného signálu a jeho frekvenční spektrum¹³.

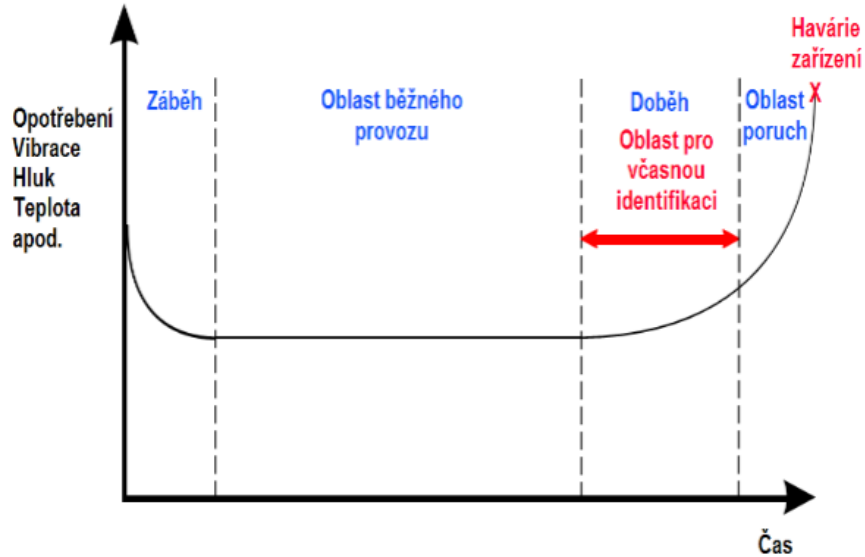
Charakteristickým rysem frekvenčního spektra periodického signálu je výsledné diskrétní čárové spektrum¹.

Ze sinusového průběhu můžeme vyhodnotit činitel výkmitu (crest factor), který je definován jako poměr amplitudy k efektivní hodnotě amplitudy:

$$K_v = \frac{x_a}{x_{ef}} \quad (2.4)$$

Z amplitudy je vyhodnocen opakující se vibrační ráz, který je naměřený jako efektivní hodnota v daném kmitočtovém rozsahu. Nárůstem četnosti rázu a výkmitu se vyhodnotí trend zhoršujícího se technického stavu. Efektivní hodnota (x_{ef}) roste, zatímco velikost x_a se stabilizuje. Výsledný extrém v časovém průběhu (K_v) je tak informací o počínajícím poškození¹⁶.

Tyto naměřené hodnoty o zhoršujícím se technickém stavu se vynášejí do tzv. „vanové křivky“, která zobrazuje velikost vibrace v čase a objektivně vyhodnocuje spolehlivost a životnost systému z hlediska jak technického, tak i bezpečnostního¹.



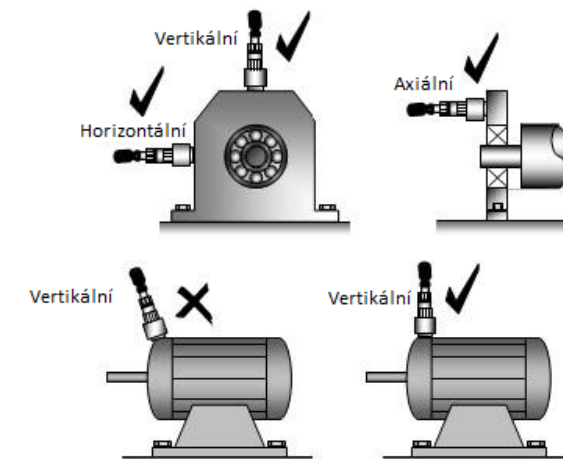
Obrázek 2.20 – Vanová křivka průběhu opotřebení ¹⁸.

2.4 Zásady volby měřících míst

Měřicí místa jsou definována jako plochy, kde se provádí v určitých cyklech monitorování stavu vibrací. Důležité je dodržování základních zásad pro volbu měřícího místa.

Snímač se umístí co nejbližší k uložení hřídele, na nerotujících částech konstrukce, nejčastěji na ložiskovém domku nebo ložiskovém stojanu, tak aby hodnoty vibrace byly co nejvyšší. Orientace uložení a označení snímačů musí být zajištěno pro možné opakované měření. Měření je nutné provádět za stejných provozních podmínek tak aby nedošlo k ovlivnění naměřených hodnot ¹⁸.

Pro zvětšení kvality měření, je důležité dodržovat tyto postupy a zajistit při měření vhodné podmínky, tak aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivnění měřícího přístroje, a to například kolísáním teploty, vlhkostí, zvukovým a magnetickým polem atd. Mezi tyto zásady správného měření patří taky vhodné způsoby upevnění snímačů, které byly popsány v kapitole 2.2.4.



Obrázek 2.21 – Možnosti uložení snímače při měření vibrací ¹².

3 Termodiagnostika

Termodiagnostika je jednou z metod zaměřenou na zobrazení a vyhodnocení teplotního pole povrchu zkoumaného objektu. Různé metody měření teplot se používají pro stanovení závažnosti stavu objektu a jeho částí, a zároveň mají za úkol dohlížet na hodnoty jeho přístupné provozní teploty¹⁹.

3.1 Teplota

Teplota je jednou ze základních stavových veličin určujících tepelný stav látky, proto je považována za nejčastější měřenou veličinu v oblasti průmyslu. Míra této kinetické energie ovlivňuje řadu výrobních procesů a regulací ať již přímo nebo nepřímo.

Teplota patří mezi základní fyzikální veličiny soustavy SI s jednotkou kelvin [K]. Nejnižší možnou teplotou je teplota, kdy ustává veškerý děj v hmotě a je definován jako absolutní nula (0 K; $-273,15\text{ °C}$). Teplotní stupnice byla odvozena pomocí termodynamických zákonů, kde teplota trojného bodu má hodnotu $T = 273,15\text{ K}$. Nejčastěji rozlišujeme Celsiovu teplotu, která má jednotku stupeň celsia a přepočtení na termodynamickou teplotu je dán vztahem²⁰:

$$t(\text{°C}) = T - T_0 = T - 273,15\text{ K}, \quad (3.1)$$

kde T je termodynamická teplota a T_0 je teplota o jednu setinu nižší než teplota trojného bodu vody.

Používaná, avšak jen v některých státech, je Fahrenheitova (teplotní) stupnice. Vzorec pro přepočtení na Fahrenheitovu teplotu je vyjádřen jako^{20, 21}:

$$t(\text{°C}) = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t - 32 \quad (3.2)$$

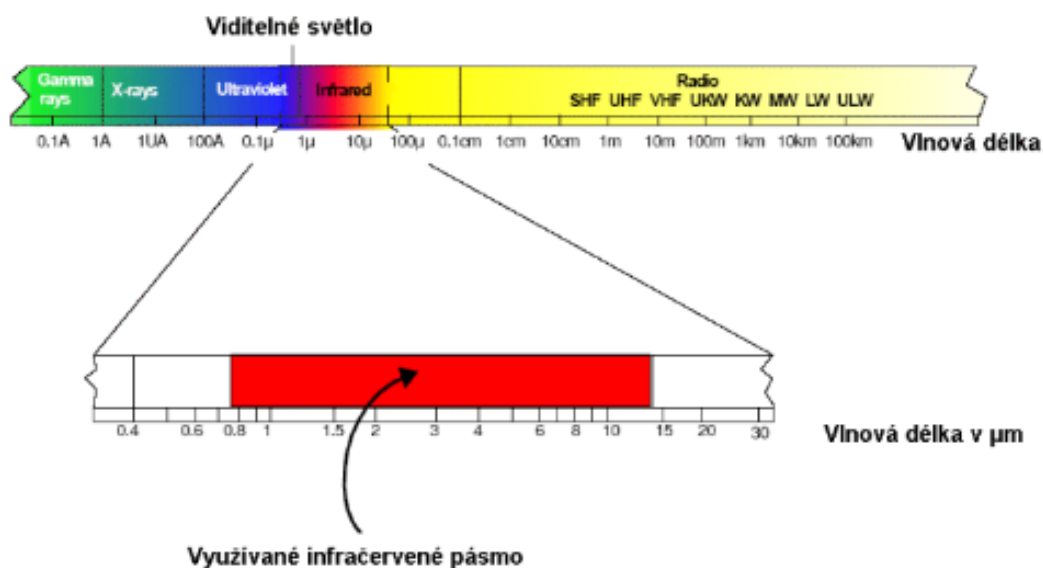
Měření teploty a jeho následný převod na elektrický signál lze rozdělit pomocí senzorů na dotykové a bezdotykové měření teploty.

3.2 Kontaktní měření teploty

Měření probíhá přímým přiložením a dotykem měřicího senzoru na povrch snímaného materiálu. Základní princip je převod tepla pomocí tepelné vodivosti materiálu. Kontaktní měření je používáno v průmyslu celkem často z důvodů levnější pořizovací ceny. Standardně používané jsou platinové teploměry Pt 100 (do cca $600\text{--}800\text{ °C}$) a termistory (hlavně termočlánky) pro střední teploty (do cca $1500\text{--}2000\text{ °C}$). Mezi nevýhody patří malá životnost teplotního senzoru, závislost tepelné vodivosti na rychlosti měření, ale hlavně malý rozsah měřené teploty. Proto se v poslední době stále častěji setkáváme s bezkontaktním měřením, které má široké možnosti využití²².

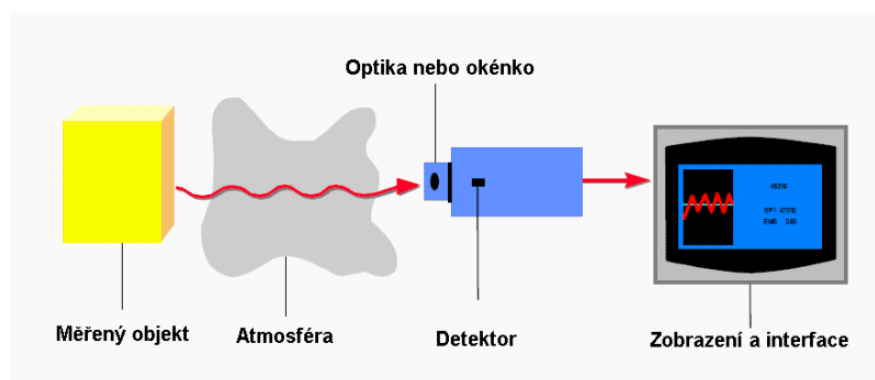
3.3 Bezkontaktní měření teploty

Bezkontaktně měřicí přístroje využívají termomechanické zákony. V termometrii bezkontaktní čidla pracují v oblasti infračerveného záření, které je okem neviditelné a leží v oblasti mezi $0,78 \mu\text{m}$ a $1000 \mu\text{m}$ ²³.



Obrázek 3.1 – Záření využívané pro bezdotykové měření teploty ²⁴.

Toto záření je optickým systémem soustředěno na detektor, jehož elektrický signál je dále zpracován a výstupem je údaj nebo termogram na monitoru výchozího zařízení.



Obrázek 3.2 – Princip bezkontaktního měření teploty ²⁴.

Podstatnou veličinou je emisivita měřeného povrchu, která je zásadní pro správné určení výsledné měřené hodnoty. Emisivita je schopnost tělesa vyzařovat teplo a je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě absolutně černého tělesa při stejné teplotě. Emisivita černého tělesa je rovná 1,0. Hodnota emisivity závisí na materiálu, úpravě a oxidaci povrchu a je jedním z hlavních zdrojů nejistoty měření, proto její vliv není možno zanedbat ²⁵.

Termodiagnostika

Tabulka 3.1 zobrazuje hodnoty emisivity dle druhu materiálu. Čím je kov více oxidovaný, tím je jeho emisivita větší (nemůžeme uvažovat ideální prostředí). Jelikož je emisivita funkcí teploty, musí být u každé hodnoty uvedena také teplota či rozsah teplot.

Tabulka 3.1 – Tabulka emisivit dle druhu materiálu ²⁶

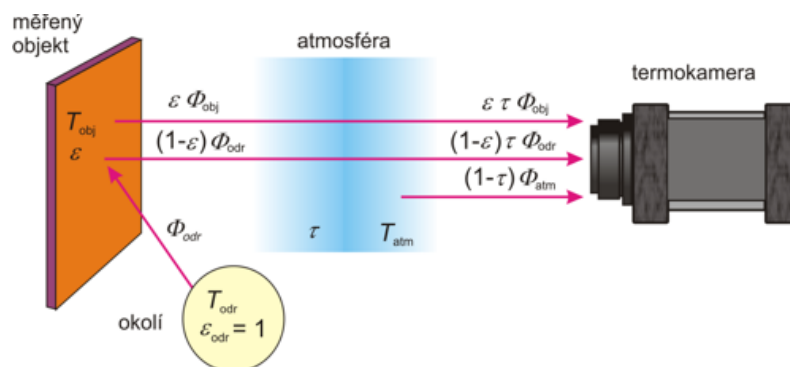
MATERIÁL	TEPLOTA	EMISIVITA
Železo, odlitek oxidovaný	38	0,63
Měď oxidovaná	50	0,6 – 0,7
Bronz oxidovaný	100	0,61

3.3.1 Termokamery

K diagnostickým účelům se stále častěji využívají termokamery (termovizní kamery), které patří k nejmodernější termodiagnostické technice. Touto metodou měření se určují skutečné teploty, které jsou použity pro stanovení závažnosti stavu objektu nebo jeho součástí. V praxi lze termokamery využít ke kontrolám: závad ložisek, jejich instalace a provoz, přetížení přístroje, nefunkčnosti chladicího systému a mnoho dalších.

Zásady měření s termokamerou

Před měřením jsou důležité některé aspekty, které mohou ovlivnit správnost prováděného měření. U termografického měření dopadá zářivý tok do měřicího systému nejen z objektu, ale i z okolí které jsou odrazeny od objektu (viz obrázek 3.3). Nedílnou částí je taky určení emisivity měřeného povrchu a odstranění nežádoucích podmínek pro měření jako jsou pára, vlhký vzduch nebo prašné prostředí.



Obrázek 3.3 – Termografické měření ²⁷.

Dle obrázku můžeme sestavit celkový zářivý tok dopadající na detektor kamery. Rovnice pro měření termokamerou je rovná:

$$\phi_{celk} = \varepsilon T \phi_{obj} + (1 - \varepsilon) T \phi_{odr} + (1 - T) \phi_{atm} \quad (3.3)$$

, kde $\varepsilon T \phi_{obj}$ je zářivý tok objektu zeslabený průchodem atmosférou (T je teplota objektu), $(1 - \varepsilon)$ vyjadřuje odrazivost objektu s teplotou T určujících teplo jiných objektů, které jsou odrazeny od měřeného povrchu do termokamery a $(1 - T)$ vyjadřuje emisivitu atmosféry a její teplotu ²⁷.

Stacionární přístroje

Jsou používány v místech, kde je požadováno kontinuální měření teploty. Zaměřeny jsou na jediný bod. Tento monitorovací systém lze připojit k PC přes sériové rozhraní, které slouží k indikaci teploty, ukládání dat a další analýze teplotních procesů²⁸.



Obrázek 3.4 – Stacionární termokamera FLIR AX8²⁹.

Ruční přístroje

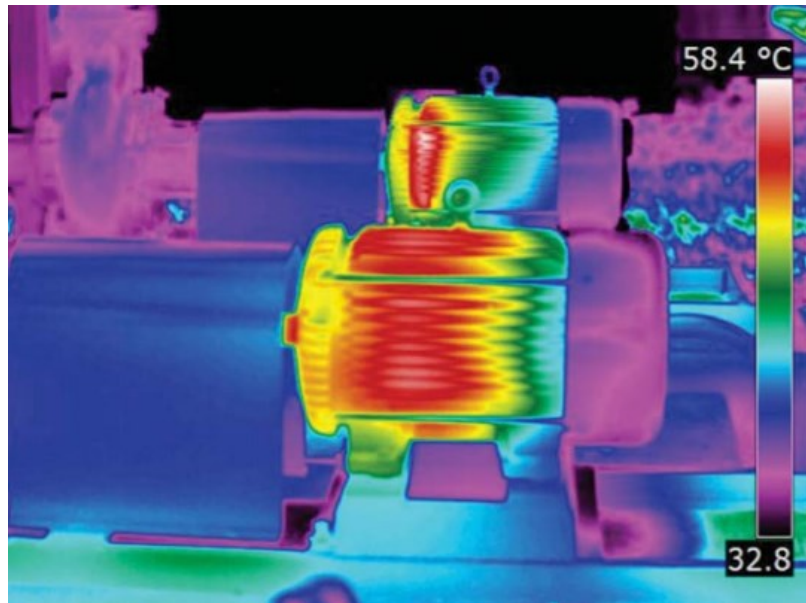
Ruční termokamery mají podobné vlastnosti jako stacionární přístroje. Nejčastěji se s nimi setkáváme v diagnostice, ke kontrole kvality a v bodovém měření kritických procesů. Tato jednorázová aplikace s jednoduchou obsluhou umožňuje okamžité stanovení provozních podmínek a možného poškození přístroje. Jedinou nevýhodou je omezení možnostmi člověka, který může měřit pouze tam, kde jsou pro něj podmínky bezpečné (nebezpečná vysoká teplota)²⁸.



Obrázek 3.5 – Ruční termokamera Fluke³⁰.

Termodiagnostika

Příkladem použití termokamery může být provoz dvou stejných elektrických motorů za stejných podmínek a stejného vlivu okolních teplot. Jeden zdroj viditelně vykazuje zvýšení teploty při provozu, což může signalizovat poškození a následné vyřazení z provozu (viz. Obrázek 3.6).



Obrázek 3.6 – Použití termokamery při diagnostice strojů ³¹.

4 Diagnostika čerpadel a elektromotorů

Tato kapitola je soustředěna především na popis čerpadel a elektromotoru, jejich rozdělení a příčiny vzniku vibrací v provozu, které ovlivňují životnost těchto přístrojů.

4.1 Čerpadla

Čerpadla jsou mechanické stroje, které dodávají kinetickou, potenciální nebo tlakovou energii kapalině, která skrz něj proudí. Tlak v čerpadle po nasátí kapaliny je nižší, než je tlak v kapalině. Kapalina tak proudí do čerpadla, ve kterém je následně zvýšen tlak natolik, aby kapalina vystupovala z čerpadla s přebytkem energie. Čerpadlo je obvykle poháněno elektromotorem, se kterým je spojeno vhodnou statickou spojkou nebo řemenem. V těžkém průmyslu se nejčastěji používají kalová čerpadla, která slouží k čerpání kapalin s obsahem různých nečistot¹.

Podle způsobu předávání energie čerpané kapalině, se čerpadla dělí na:

- Čerpadla hydrostatická (HS)
 - Pístová
 - Rotační
- Čerpadla hydrodynamická (HD)
 - Radiální
 - Diagonální a axiální
- Čerpadla proudová (PR)
 - Vodní ejektor
 - Mamutové čerpadlo
 - Vodní trkače

Podrobněji se zaměříme zejména na čerpadla hydrodynamické radiální, jelikož jsou součástí měření mé praktické části bakalářské práce.

4.1.1 Hydrodynamická čerpadla radiální

Konstrukce čerpadla používaného v těžkém průmyslu je většinou konzolového typu. Oběžné kolo je uloženo na konci hřídele a rotuje do hydraulického kolektoru s použitím jednoduché nebo dvojité spirály. Oběžná kola mají různé tvary s různě zakřivenými lopatkami podle účelu použití. Z oběžného kola vstupuje čerpaná kapalina po celém obvodu do spirální skříně. Spirální skříně je zakřivený kanál, jehož průřez se postupně zvětšuje a vede kapalinu do výtlačného hrdla³².



Obrázek 4.1 – Popis části radiálního čerpadla typu WARMAN 14-12 G-G ³³.

4.1.2 Vibrace čerpadel

- **Kavitace**

Kavitace způsobuje snížení výkonu strojů, protože spotřebovává část produkované energie. Tento jev se vyskytuje nejčastěji u rychle rotujících součástí vodních strojů a to zejména u čerpadel. Kavitační dutiny vznikají v místech proudových polí čerpané kapaliny, v interiéru čerpadla nebo potrubního systému, kde místní tlak v kapalině poklesne pod hodnotu tlaku nasycených par čerpané kapaliny. Vytvořené kavitační dutiny můžou na povrchu stroje způsobit i zničení dané součástky, jelikož vyvolá erozi materiálu a jeho kusy jsou odtrženy.

S kavitací se nejčastěji setkáváme u hydrodynamických čerpadel, u kterých označujeme za kritické místo vstup do čerpadla a oběžného kola nebo výstupní část lopatek oběžného kola.

Mimo narušování povrchu některých dílů čerpadel, má kavitace taky velký podíl na hlučnosti a vibracích čerpadel. Kritický vliv má kavitace na vstupní prostor oběžného čerpadla, ve kterém může dojít k přerušení přísunu kapaliny způsobené sníženým přísunem energie a následně způsobit jeho havárii ¹.

- **Monofrekvenční složky vibrací**

V hydrodynamickém čerpadle probíhá hydrodynamická interakce mezi rotující a statorovou lopatkovou mříží. Kapalina obtéká jednotlivé lopatky, mění směr proudění a tím vznikají tlakové pulzy, které naráží na hydraulický povrch části čerpadla. Zatížení tlakovými pulsy vyvolává vibrace rotorových i statorových dílů čerpadla ¹.

4.2 Elektromotory

Elektromotory jsou jedny z nejpoužívanějších typu pohonu v průmyslu. Svou funkčností mění elektrickou energii na mechanickou. Pro požadované použití je důležité pohonný elektromotor správně dimenzovat s ohledem na jeho výkonovou charakteristiku. Z hlediska provozních a výrobních nákladů patří mezi levné, spolehlivé a efektivní přístroje³⁴.

Podle druhu elektrické energie tyto motory dělíme na¹:

- Stejnoseměrné elektromotory
 - S cizím buzením
 - Derivační
 - Sériové
 - Kompaundní
- Střídavé elektromotory
 - Synchronní
 - S kotvou na krátko
 - S kotvou kroužkovou
 - Asynchronní
 - S kotvou na krátko
 - S kotvou kroužkovou

V dalších bodech budeme podrobněji rozebírat problematiku funkčnosti asynchronních střídavých elektromotorů, jelikož jsou součástí mé praktické části práce.

4.2.1 Asynchronní indukční elektromotory

Díky své jednoduché konstrukci a provozní spolehlivosti jsou tyto trojfázové elektromotory nejpoužívanější. Využívají se především tam, kde se rychlost zatížení téměř nemění a nevyžaduje regulaci rychlosti. Nejčastěji používaným pracovním strojem této skupiny je motor v provedení jako kotva nakrátko.

Vyznačuje se těmito vlastnostmi:

- Jednoduchá a robustní konstrukce.
- Vysoká provozní spolehlivost.
- Provoz nenáročný na údržbu.
- Nízká pořizovací cena.

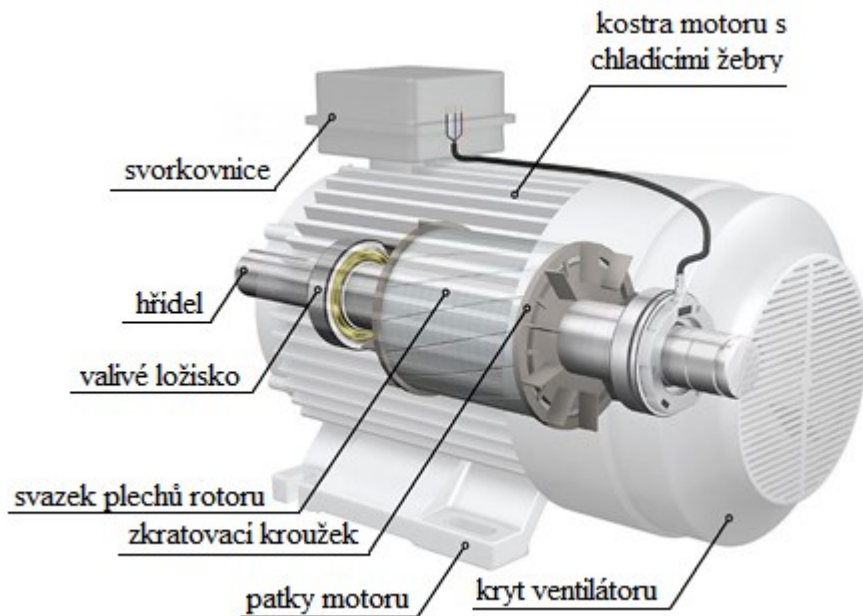
Protože lze otáčky pomocí třífázových motoru s frekvenčním měničem ovládat lépe, ztrácejí stejnosměrné a třífázové motory s kroužkovou kotvou stále více na významu.

Rotorové plechy motorů jsou tlusté 0,5 mm a nasazují přímo na hřídel, který je buď vroubkován, nebo má drážku. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem je co nejmenší s ohledem na přesnost výroby a bezpečnost provozu.

Diagnostika čerpadel a elektromotorů

Na drážkách plechového svazku rotoru se nachází vinutí statoru, z hliníku nebo mědi, které je zalité umělou pryskyřicí. Pomocí kruhů na obou koncích jsou tyče spojeny nakrátko.

Počet a krok cívky se liší podle toho, kolik má dosahovat otáček. Tyče a kruhy tvoří takzvanou klec, proto se často třífázový motor popisuje jako motor s klecovým rotorem. Ložiska mechanicky spojují otáčivé části s nepohyblivými částmi. Většinou se používají radiální kuličková ložiska, méně často cylindrická válečková ložiska. Velikost ložisek závisí na silách a otáčkách, které musí dané ložisko zachycovat ^{1, 34}.



Obrázek 4.2 – Popis asynchronního elektromotoru ³⁴.

4.2.2 Vibrace elektromotorů ³⁴

- **Excentricita statoru nebo „volné železo“**

Excentricita neboli staticky nerovnoměrná vůle mezi rotorem a statorem produkuje nerovnoměrnou stacionární vzduchovou mezeru a generují tak silné vibrace. Excentricitu statoru většinou způsobují měkké patky nebo deformovaný základ. Uvolněním nebo nedostatečnou tuhostí nosné části statoru může dojít k nerovnoměrnému ohřevu, který deformuje stator a vyvolává indukované vibrace.

- **Excentrický rotor**

Excentrické rotory vyvolávají rotující proměnnou vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem, která způsobuje pulzující vibrace. Tyto vibrace většinou vznikají v důsledku nesouososti, deformace nebo jsou způsobené použitím měkkých patek.

- **Problémy rotoru**

Vysoké vibrace na otáčkové frekvenci rotoru jsou nejčastěji způsobeny zlomenou nebo prasklou rotorovou tyčí nebo špatným spojením mezi rotorovými tyčemi.

5 Praktická část

Praktická část práce zhodnocuje technický stav vodních horizontálních a vertikálních čerpadel společnosti Třinecké železářny, a.s. Čerpadla na daném úseku mají za úkol dopravovat směs granulátu z nálevky vysokých pecí na zásobníky a čerpat přeřadovou vodu zpět do usazovacích nádrží. Tato část zahrnuje popis použitého vybavení, jednotlivé metody a způsoby vyhodnocení možných poruch stroje.

5.1 Použité vybavení

Tato kapitola je věnována použitému vybavení při realizaci praktické části práce. Shrnuty jsou důležité parametry měřicích přístrojů a senzorů používaných při měření.

5.1.1 Analyzátor ADASH VA4 PRO

Pro diagnostiku čerpadel byl používán přístroj od firmy ADASH. Tento přístroj typu ADASH VA4 PRO, je založený na unikátní DSP desce (Digital signal procesing), která umožňuje díky své rychlosti 4 kanálová měření v reálném čase. Vibrace jsou analyzovány pomocí snímačů vibrací a převedeny na data zpracovatelná příslušným softwarem. Přístroj je vybaven základním modulem analyzátoru, datakolektoru a rekordéru měřených signálů. Kromě toho disponuje moduly pro provozní vyvažování strojů, měření rozběhů a doběhů, ultrazvukem, akustickým měřením, rázovými testy, kontrolou mazání, poslechem vibračního signálu a také modulem provozních tvarů kmitů.

Přístroj je určen pro pracovníky, kteří se zabývají diagnostikou strojů a provádí vyvažování, servis a inspekční prohlídky strojů ³⁶.

Interní software, který tento přístroj využívá, disponuje těmito parametry:

- 4 měřicí simultánní kanály
- Frekvenční rozsah max. 90 kHz
- Paměť 120 GB

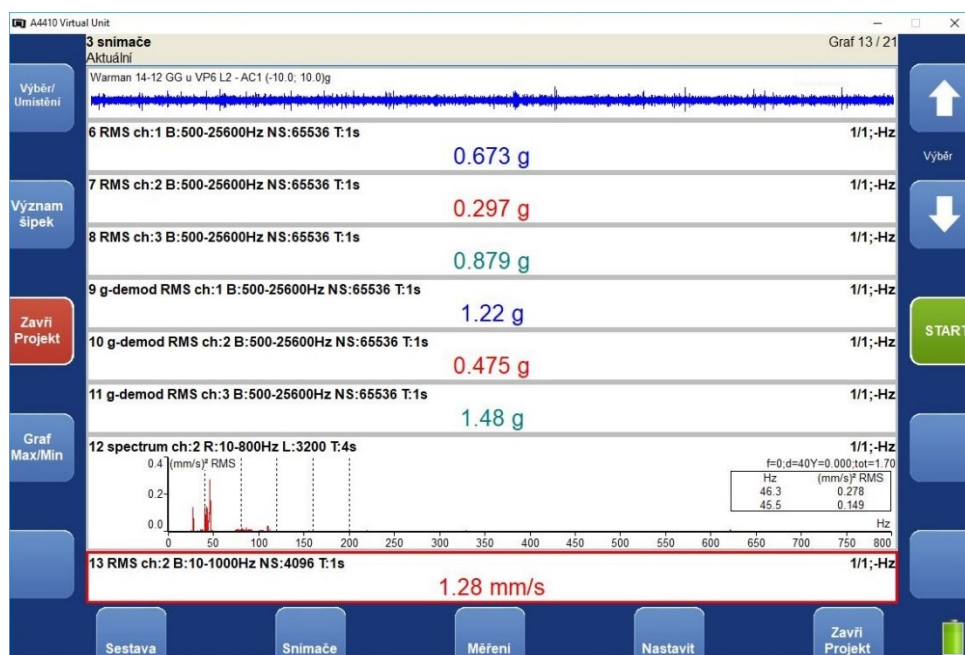
Software nabízí pro zpracování dat:

- FFT min. 100 čar a max. 3 276 800 čar v reálném čase
- Možnost 20 hodin nahrávání signálu
- Obsažena je norma ISO 10816-3 (Norma pro vibrace)
- Vstup pro tříosý snímač (3 D)
- Volitelná uživatelská pásma
- ACMT – analýza pomaloběžných ložisek
- Řadová analýza



Obrázek 5.1 – Analyzátor vibrací ADASH A440 VA4 PRO³⁶

Data byla vyhodnocená počítačovým softwarem A4410 Virtual Unit od té samé firmy.



Obrázek 5.2 – Softwarové rozhraní programu

5.1.2 Snímače vibrací

Spolu s přístrojem ADASH byly použité snímače vibrací ADASH A102-1 A, ADASH A104-1 A, Hansford sensor HS 100 a Monitran MTN/2200SM6, které snímají jak rychlost vibrací, tak i zrychlení. Zároveň vibrace byly snímány ve třech směrech a to vertikálním, horizontálním a axiálním. Snímače se upevňovaly, již ve zmíněných směrech na diagnostikované zařízení pomocí magnetu. Při upevňování bylo potřeba dbát na správné upevnění, a především na zvolení správného měřeného místa, aby nevznikly případné chyby měření. Povrch, ze kterého se vibrace snímají, by měl být rovný a bez nečistot, proto před měřením byly tyto podmínky dodrženy. Upevnění sond na diagnostikovaném zařízení bylo potřeba důkladně zkontrolovat.

Praktická část

Kontrolována byla sonda, zda dobře doléhá nebo zda se neviklá, protože pracovní prostředí, ve kterém probíhalo měření, bylo znečištěno od denní výroby a na magnet, kterým jsou snímače připevňovány, se přichytával nechtěný materiál.



Obrázek 5.3 – Akcelerometry AC102,104-1 A, HS 100 a MTN/2200SM6^{37,38,39,40}

Základní parametry akcelerometru AC102-1 A³⁷

- Senzitivita: 100mV/g
- Dynamický rozsah: ± 50 g
- Frekvenční rozsah: 0,5-15000 Hz
- Teplotní rozsah: -50–121 °C
- Snímací prvek: keramický PZT

Základní parametry akcelerometru AC104-1 A³⁸

- Senzitivita: 100mV/g
- Dynamický rozsah: ± 50 g
- Frekvenční rozsah: 0,5-10000 Hz
- Teplotní rozsah: -50–121 °C
- Snímací prvek: keramický PZT

Základní parametry akcelerometru HS- 100³⁹

- Senzitivita: 100mV/g
- Dynamický rozsah: ± 50 g
- Frekvenční rozsah: 2-10000 Hz
- Teplotní rozsah: -50–140 °C
- Snímací prvek: keramický PZT

Základní parametry akcelerometru Monitran MTN/2200SM6⁴⁰

- Senzitivita: 100mV/g
- Dynamický rozsah: ± 80 g
- Frekvenční rozsah: 2-10000 Hz
- Teplotní rozsah: -50–140 °C
- Snímací prvek: keramický PZT

5.1.3 IR Termokamera FLUKE TiS55

Mezi použité přístroje patří také IR termokamera značky FLUKE TiS55, se kterou byla měřena teplota diagnostikovaných zařízení. Výsledné termosnímky sloužily k identifikaci možné poruchy. Z provozního hlediska bylo možné změřit teplotu pouze vybraných zařízení, zbylé typy přístrojů nejsou v přetržitém provozu, proto by měření nemělo zcela větší význam.

Základní vlastnosti termokamery ⁴¹:

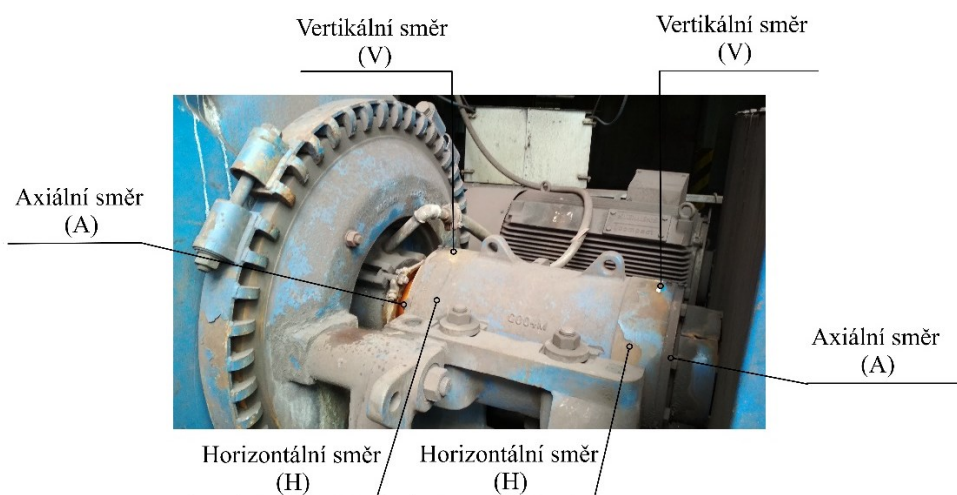
- Rozlišení snímků 220 x 165 dle normy RESNET
- Ruční ostření
- Digitální fotoaparát s průmyslovým výkonem 5 Mpx
- Rozsah měřící teploty od -20 °C až do +450 °C
- Obnovovací frekvence 9 Hz a 30 Hz
- Teplotní citlivost $\leq 0,08$ °C při teplotě objektu 30 °C

5.2 Postup měření

Diagnostika byla zaměřena především na horizontální a vertikální čerpadla, dále na elektromotory pohánějící čerpadla a celkový stav sestavy. Pro docílení správného měření bez zdrojů nejistot, byla určena vhodná místa rozmístění jednotlivých snímačů. Získané hodnoty z měření se zpracovaly pomocí programu A4410 Virtual Unit. Dále podle normy ČSN ISO 10 816-7 se tyto data vyhodnotily a určil se technický stav zařízení.

5.2.1 Rozmístění snímačů

Na každém zařízení byla diagnostikována dva ložiska na motoru a dva ložiska čerpadla. Ložiska motoru mají označení L1 a L2. Měření bylo provedeno ve třech směrech a to horizontálně (H), vertikálně (V) a axiálně (A). Ložiska čerpadel jsou označena L3, L4 a snímány byly taky ve všech třech směrech, proto označení směru měření je stejné jak u ložiska L1, L2 a to horizontální (H), vertikální (V) a axiální (A). Pro každý měřený objekt bylo přidáno také označení místa, kde se dané zařízení na pracovišti nachází.



Obrázek 5.4 – Rozmístění snímačů na měřeném zařízení

Praktická část

Po rozmístění daných snímačů byly pomocí přístroje ADASH naměřena potřebná data pro další analýzu a výslednou diagnostiku zařízení. Na některých měřených místech byl problém se snímáním informací, protože z konstrukčního hlediska nebylo možné umístit snímací sondu na určené místo. Měření bylo také ovlivňováno prostředím, ve kterém se zařízení vyskytují, a to zejména prašností a vodní párou, která způsobuje hlavní nerovnosti povrchu.

5.2.2 Postup vyhodnocení

Při vyhodnocování daného měření byly dodržovány veškeré normy, které uvádí doporučené provozní hodnoty vibrací. Díky těmto hodnotám byl následně zhodnocen celkový technický stav zařízení. Jednotlivé tabulky zobrazené níže slouží k přehlednému orientování se v naměřených hodnotách. Dodržena byla norma ČSN ISO10816-7.

Tabulka 5.1 – Doporučené hodnoty rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm/s]
A/B	2,5 mm/s
B/C	4,0 mm/s
C/D	6,6 mm/s

Tabulka 5.2 – Doporučené hodnoty zrychlení vibrací v pásmu 500-25k Hz

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota zrychlení vibrací [g]
A/B	0,5 g
B/C	2 g
C/D	4 g

Pásmo A: Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, jsou nově přijaté.

Pásmo B: Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, nemají určenou omezující dobu provozu.

Pásmo C: Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za nevhodné pro dlouhodobý a trvalý provoz, a proto mohou být provozovány jen do té doby, než se zařídí možnost opravy stroje.

Pásmo D: Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou vyvolat poškození stroje.

Tabulka 5.3 – Výsledné zhodnocení technického stavu zařízení

Celkový technický stav stroje	VYHOVUJÍCÍ	ZHORŠENÝ	NEPŘIJATELNÝ
-------------------------------	------------	----------	--------------

Klasifikace termosnímků je provedena dle přiložené tabulky 5.4.

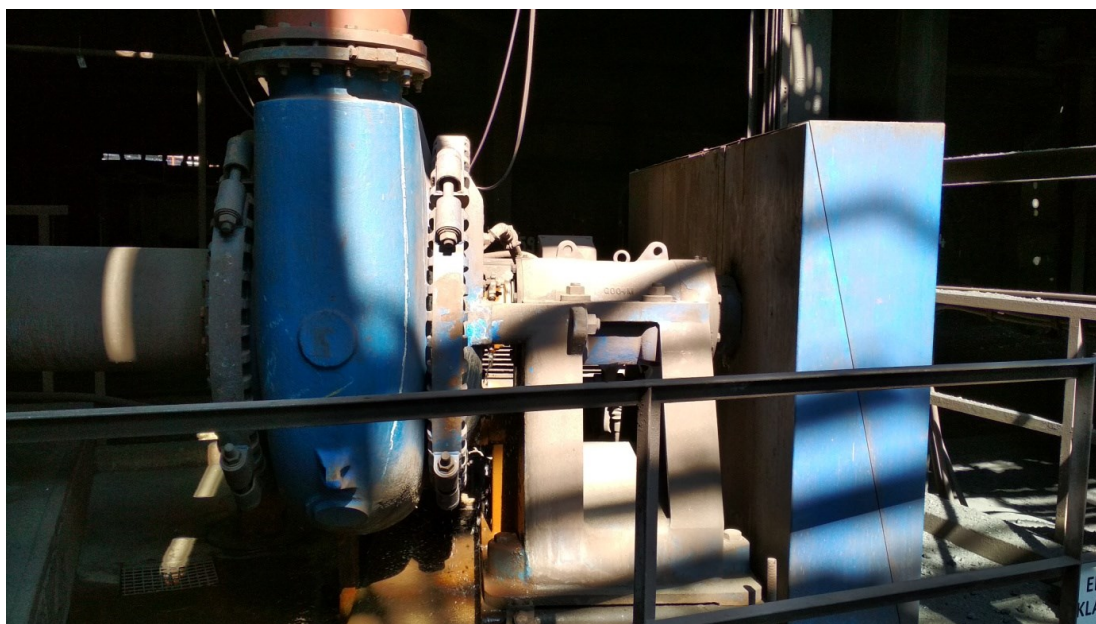
Tabulka 5.4 – Klasifikace přístrojů do jednotlivých stupňů závažnosti dle naměřených teplot

Klasifikace	Stav zařízení	Termín nápravy	Stupeň oteplení (interval v °C)
I. stupeň	Výborný	Bez opatření	0 °C < Δt < 10 °C
II. stupeň	Vyhovující	Oprava při plánované revizi	10 °C < Δt < 30 °C
III. stupeň	Uspokojivý	Oprava do jednoho měsíce	30 °C < Δt < 50 °C
IV. stupeň	Neuspokojivý	Do jednoho týdne	50 °C < Δt < 80 °C
V. stupeň	Nepřípustný	Oprava ihned	80 °C < Δt

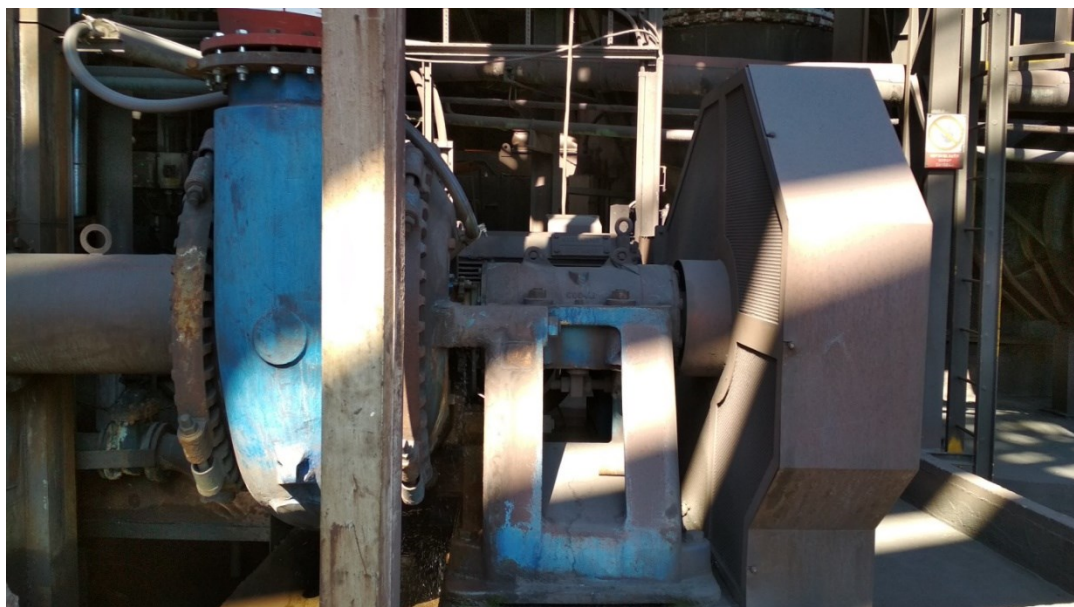
5.3 Diagnostika čerpadel Warman 14-12 GG u VP4 a VP6

Čerpadla Warman 14-12 GG, která jsou umístěné venku u granulační nálevky vysokých pecí VP4 a VP6, mají za úkol čerpat granulační směs z nálevky na granulační zásobníky. Čerpadla jsou namáhaná přepravovaným médiem, které tvoří směs vody a granulátu z vysokých pecí.

Diagnostikované zařízení se nachází venku, a proto na něj působí i vnější vlivy jako je déšť a prach z výroby, které mohou ovlivňovat jeho funkčnost. Možný vliv mají na chod i projíždějící vlaky s nákladem, které tvoří také určitý typ vibrací.



Obrázek 5.5 – Čerpadlo Warman 14–12 GG u VP6



Obrázek 5.6 – Čerpadlo Warman 14-12 GG u VP4

Čerpadla i motory jsou ukotvené na mohutných betonových základech, aby byla při jejich chodu zaručena dobrá stabilita, ustavení a zůstala zachována osová výška vůči funkčním komponentům. Motor pohání čerpadlo pomocí klínových řemenů. Poháněná jsou 3fázovým asynchronním motorem s výkonem 355 kW od firmy Siemens.

Motor pracuje při provozních otáčkách 1488 ot/min (štitkové otáčky). Čerpadlo dle výpočtu pomocí převodového poměru pracuje při otáčkách 500 ot/min

5.3.1 Diagnostika čerpadla Warman 14-12 GG u VP6



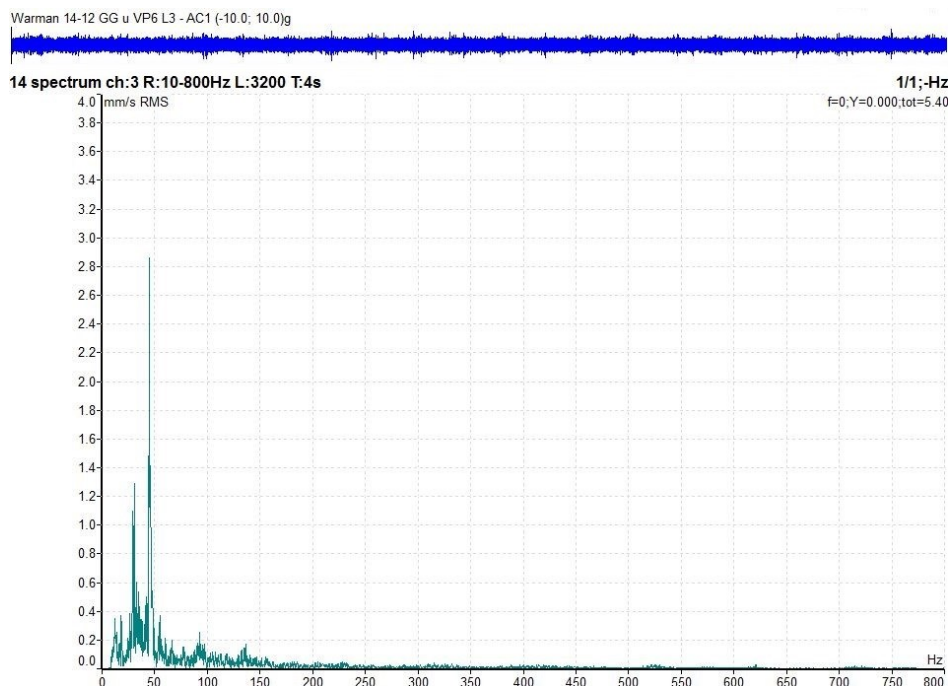
Obrázek 5.7 – Warman 14-12 GG u VP6

Tabulka 5.5 – Naměřené hodnoty vibrací na čerpadle Warman 14-12 GG u VP6

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500-25600 Hz (a_{RMS})					
Popis		Motor		Čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1488		485	
v_{RMS} [mm/s]	Vertikálně [V]	0,52	0,76	6,39	4,10
	Horizontálně[H]	2,42	1,58	15,05	12,5
	Axiálně [A]	0,81	0,79	6,17	5,87
a_{RMS} [g]	Vertikálně [V]	1,14	0,68	1,17	1,04
	Horizontálně[H]	0,33	0,26	1,04	0,66
	Axiálně [A]	1,16	0,87	0,63	0,77
Poznámka		bez zátěže	bez zátěže	bez zátěže	bez zátěže

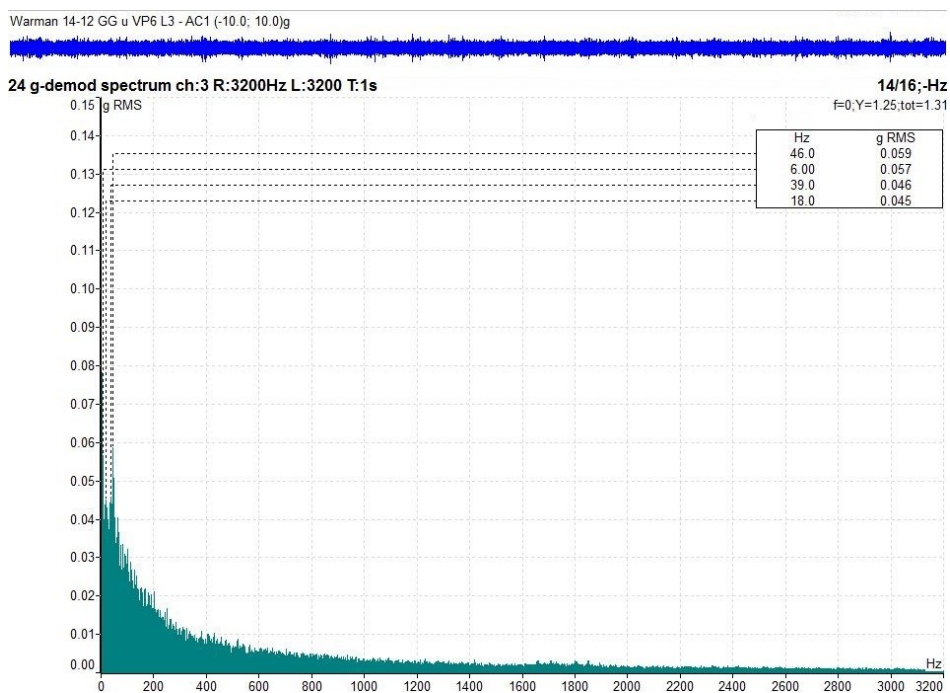
Hodnoty rychlosti vibrací naměřené na ložisku L1-VP6 a L2-VP6 se podle tabulky 5.5 nacházejí v pásmu A/B. Ve všech měřených směrech jsou hodnoty ještě v povolených mezích.

Co se týče hodnot zrychlení vibrací, tak tyto hodnoty u ložiska L1-VP6 a L2-VP6 jsou dle tabulky 5.5 v požadovaných mezích. Při měření rychlosti vibrací na ložiskách čerpadla L3-VP6 a L4-VP6 byly naměřeny velmi vysoké hodnoty vibrací na obou ložiskách. Na ložisku L3-VP6 ve všech měřených směrech jsou hodnoty spadající do pásma, které se značí jako pásmo C/D, a dokonce v horizontálním směru převyšují hodnotu pásma D. Vibrace na ložisku L4-VP6, co se týče vertikálního a axiálního směru, spadají do kategorie C/D což poukazuje na vznikající závadu na zařízení. V horizontálním směru je výrazně překročena hodnota pásma D. Hodnoty vibrací v tomto pásmu jsou považovány za natolik nebezpečné, že mohou vyvolat poškození stroje. Proto bylo doporučeno provést údržbu na tomto zařízení. V případě zjištění závady po provedené prohlídce je třeba provést výměnu vadných komponentů. Hodnoty zrychlení vibrací u ložiska L3-VP6 a L4-VP6 jsou podle tabulky v pásmu B, a proto jsou v požadovaných mezích.



Obrázek 5.8 – Spektrum rychlosti vibrací ložiska L3-VP6 v axiálním směru

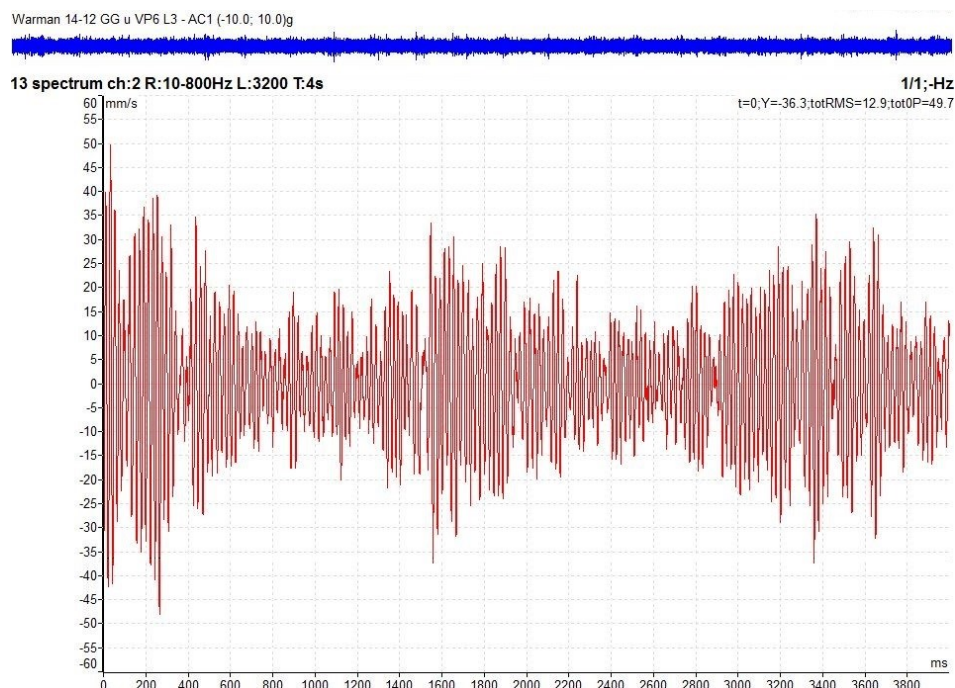
Při rozboru spektra rychlostí vibrací v axiálním směru se na L3 vyskytují složky harmonické i interharmonické. Do 100 Hz je neobvyklý nárůst vibrační energie, což poukazuje na vývoj poruchy. Dalším rozбором těchto spekter lze dojít k názoru, že velkou mírou vibrací produkují klínové řemeny, které toto zařízení pohání. Podle axiálních spekter vibrací lze usoudit, že tento typ pohonu má mechanické problémy. Příčinou mohou být již výše zmíněné klínové řemeny, které jeví známky opotřebení nebo uvolněné šrouby základny zařízení. Tento problém taky značně přispívá k poškozování ložisek.



Obrázek 5.9 – Obálka spektra zrychlení vibrací ložiska L3-VP6 v axiálním směru

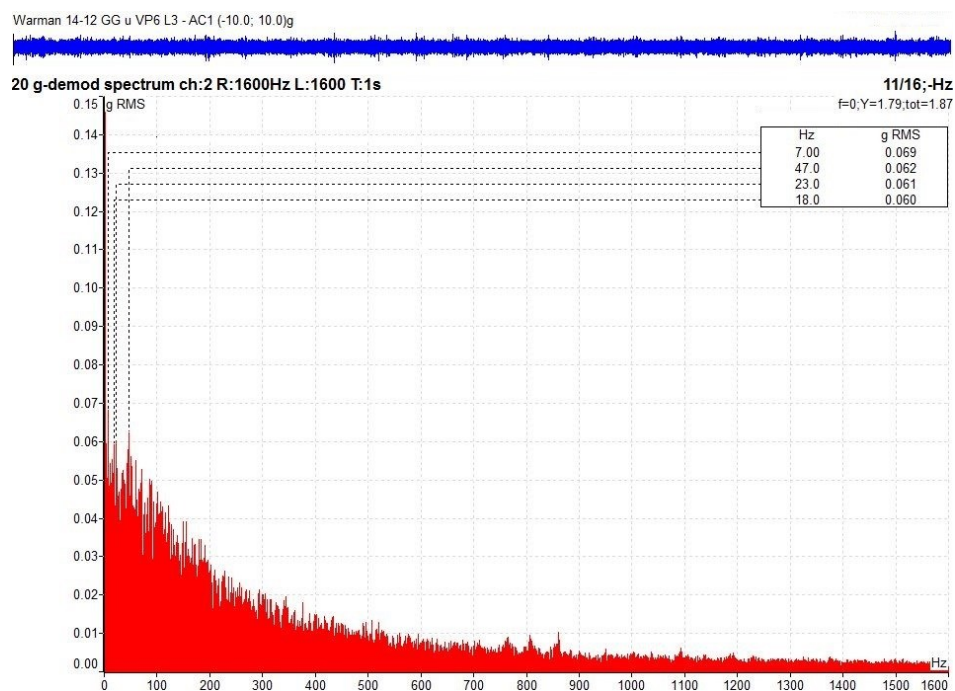
Praktická část

Podle obálkové analýzy zrychlení vibrací lze vyvodit, že ložiska nejsou poškozené. Toto spektrum zobrazuje i správnost mazání ložiska, které v tomto případě je dostačující.



Obrázek 5.10 – Časové spektrum rychlosti vibrací ložiska L3 v horizontálním směru

Na tomto průběhu je dobře vidět opakující se pravidelný signál, který poukazuje na vadu tohoto zařízení. Demontáž zařízení nebyla provedena, a proto nemůžeme určit přesnou vadu, ale domnívám se, že vibrace způsobuje přepravovaný materiál, který tvoří směs horké vody s granulátem.



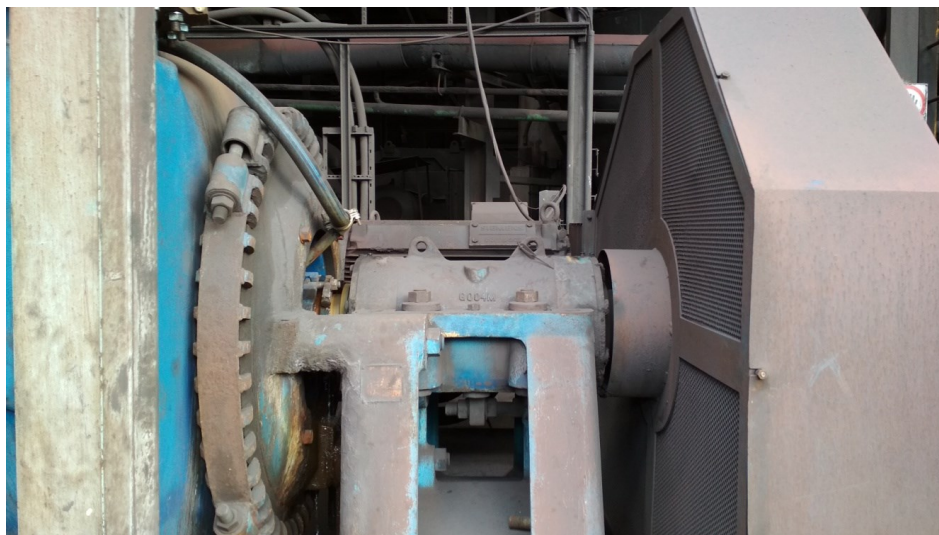
Obrázek 5.11 – Obálka spektra zrychlení vibrací ložiska L3-VP6 v horizontálním směru

Obálka zrychlení ložiska L3-VP6 nevykazuje podle spektra žádnou závadu na ložisku.

Vyhodnocení:

Zařízení prošlo důkladnou kontrolou, byly dotaženy všechny šrouby na základně. Provedla se také kontrola a napnutí klínových řemenů. Při další prohlídce se provede kontrolní měření, zda se stav nezhoršil.

5.3.2 Diagnostika čerpadla Warman 14-12 GG u VP4



Obrázek 5.12 – Warman 14-12 GG u VP4

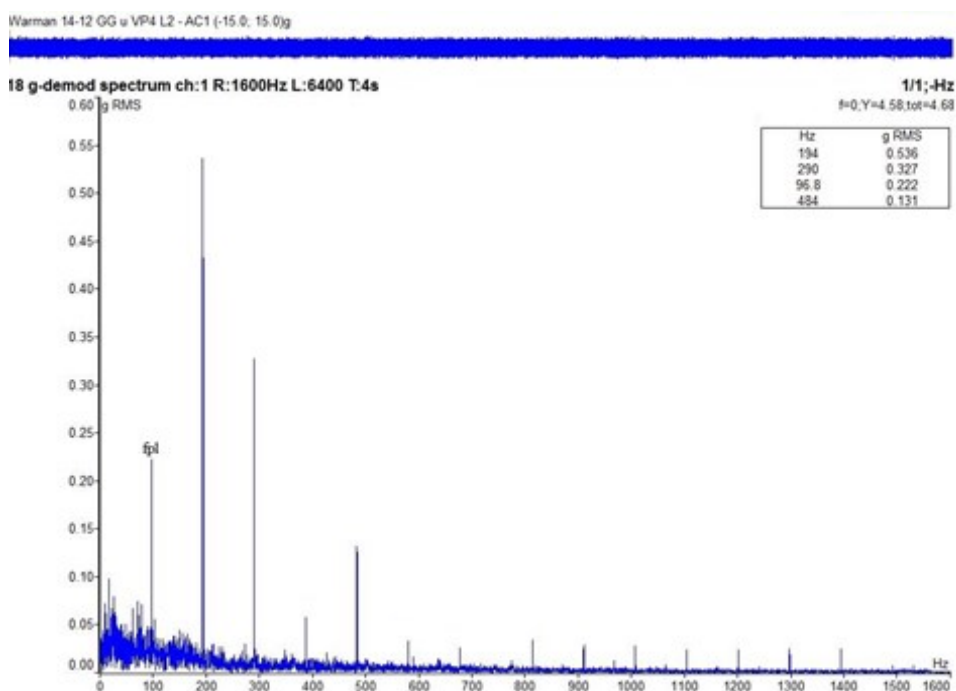
Tabulka 5.6 – Naměřené hodnoty vibrací na čerpadle Warman 14-12 GG u VP4

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500-25600 Hz (a_{RMS})					
Popis		Motor		Čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1488		485	
v_{RMS} [mm/s]	Vertikálně [V]	0,75	0,79	0,71	0,69
	Horizontálně[H]	1,19	1,41	0,702	0,54
	Axiálně [A]	2,61	1,69	0,915	0,82
a_{RMS} [g]	Vertikálně [V]	1,08	2,99	1,20	0,69
	Horizontálně[H]	1,11	0,53	1,13	0,39
	Axiálně [A]	1,36	2,06	0,928	0,59
Poznámka		Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži

Hodnoty rychlosti vibrací motoru na ložiskách L1-VP4 a L2-VP4 byly naměřeny v požadovaných směrech a z hodnot můžeme usoudit, že jak na ložisku L1-VP4 tak na ložisku L2-VP4 jsou naměřené hodnoty ve všech směrech podle tabulky 5.6 v pásmu

Praktická část

označovaném jako pásmo A/B. V tomto pásmu mohou být zpravidla zařízení provozována po neomezenou dobu. Hodnoty zrychlení vibrací u ložiska L1-VP4 jsou podle tabulky v pásmu A/B, proto může být v provozu po neomezenou dobu, ale co se týče zrychlení vibrací u ložiska L2-VP4 jsou tyto hodnoty ve vertikálním a axiálním směru odpovídající možnému výskytu opotřebení ložiska. Proto by se mělo na toto ložisko dávat větší pozor a v případě zhoršení naplánovat jeho výměnu. Rychlost vibrací u ložiska L3-VP4 a L4-VP4 spadá do pásma A/B, proto ložiska mohou být v provozu po neomezeně dlouhou dobu. Taktéž naměřené hodnoty zrychlení vibrací těchto ložisek nevykazují žádné známky poškození. Tyto hodnoty spadají do pásma označené jako pásmo A/B.

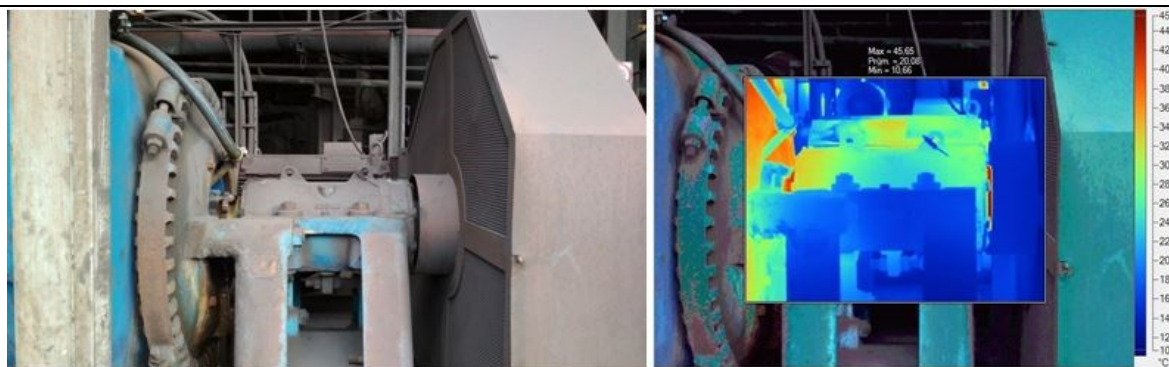


Obrázek 5.13 – Obálka spektra zrychlení ložiska L2-VP4 ve vertikálním směru

Z daného spektra (viz. Obrázek 5.13) je viditelné poškození ložiska. Poruchy jsou zobrazeny harmonickými násobky, které začínají frekvencí 96,5 Hz.



Obrázek 5.14 – Termosnímek motoru čerpadla Warman 14-12 GG u VP4



Obrázek 5.15 – Termosnímek ložiskového domku čerpadla Warman 14-12 GG u VP4

Ze zobrazených termovizních záznamů je zřetelně vidět intenzita a pozice uvolňovaného tepla. Teplota byla měřena na motoru, který pohání čerpadlo (viz obrázek 5.14) a na ložiskovém domku čerpadla (viz obrázek 5.15). Teplota motoru nepřesahuje povolenou mez pro funkčnost v provozu. Na ložiskovém domku byly naměřeny zvýšené hodnoty pouze v oblasti ložiska L3, avšak tyto hodnoty byly pouze v rozmezí 40-50 °C, a proto nejsou považovány za nebezpečné.

Tabulka 5.7 – Hodnoty termosnímků zařízení Warman 14-12 GG u VP4

Odražená zdánlivá teplota	24 °C
Emisivita	0,95
Přenos	0,99
Teplota ovzduší	25 °C
Relativní vlhkost	75%
Rychlost proudění vzduchu	do 0,5 m.s ⁻¹
Vzdálenost IR termokamery od objektu	do 1m
Stav	II. stupeň
Oteplení soustavy	12,7 °C
Zatížení soustavy	100%

Vyhodnocení:

U tohoto zařízení doporučuji vyměnit ložisko L2-VP4 na kterém je, jak lze vidět podle přiloženého spektra, již probíhající závada.

5.4 Diagnostika čerpadel Warman 300 PC-PG pro VP4 a VP6

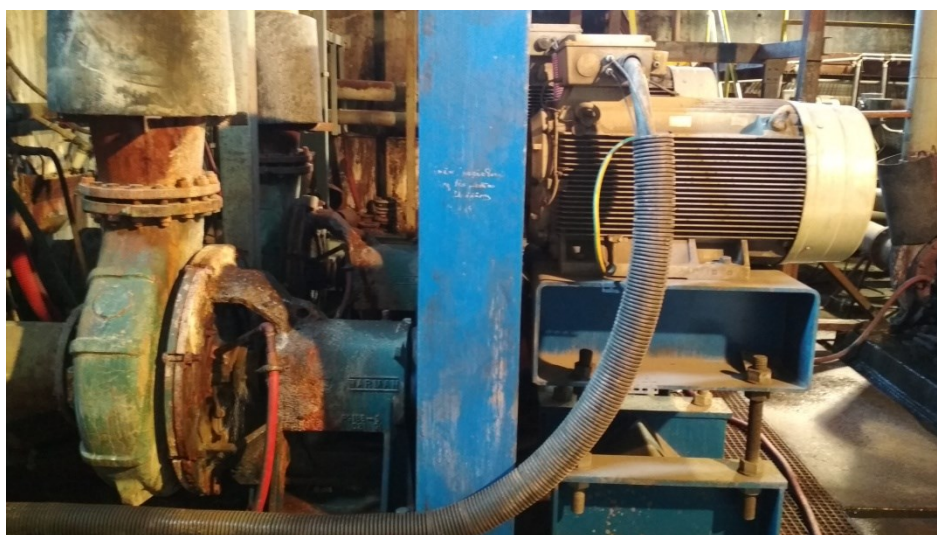
Tyto čerpadla jsou umístěna v čerpadlovně na granulaci. Úkolem těchto čerpadel je čerpání vody do granuláčních komor VP4 a VP6. Jelikož se čerpadla nachází uvnitř v hale, nepůsobí na ně tak vnější vlivy jak na čerpadla Warman 14-12 GG, které jsou umístěné venku.

Praktická část

Tyto čerpadla jsou namáhané médiem, které musí dopravovat, protože voda procházející zařízením má okolo 70 °C a k tomu se v ní vyskytuje ještě zbytkový granulát. Vliv na tyto zařízení má i vysoké vlhko a vyskytující se vodní pára.



Obrázek 5.16 – Diagnostikované čerpadlo Warman 300 PC-PG pro VP6 s gemexem



Obrázek 5.17 – Diagnostikované čerpadlo Warman 300 PC-PG pro VP4

5.4.1 Diagnostika čerpadla Warman 300 PC-PG pro VP6

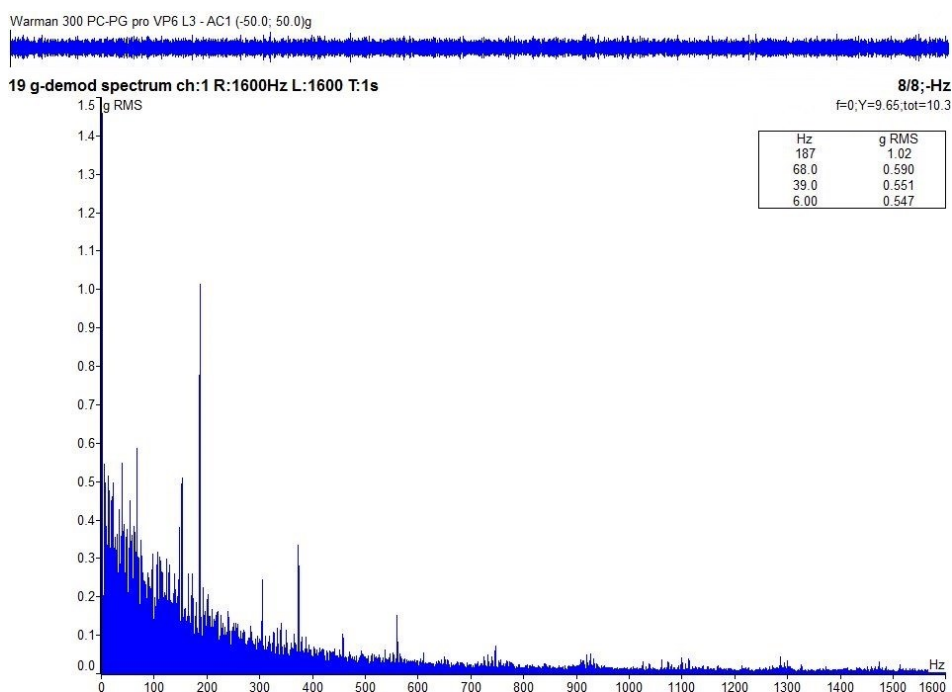
Čerpadlo je usazené na betonovém podlaží. Ukotvené je kotevními šrouby, které drží celou stabilitu tohoto čerpadla. K betonovému podlaží je také ukotvená ocelová konstrukce, která spolu s napínacím zařízením „Gemex“ slouží pro ukotvení motoru. Zařízení „Gemex“, má za úkol hydraulicky napínat klínový řemen, který pohání čerpadlo.

Technické parametry Warman 300 PC-PG:

Tento typ čerpadla pohání 3fázový asynchronní motor od firmy Siemens. Motor disponuje výkonem 250 kW a pracuje při otáčkách 1488 ot/min při frekvenci 50 Hz. Čerpadlo pracuje při otáčkách 885 ot/min.

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500-25600 Hz (a_{RMS})					
Popis		Motor		Čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1488		885	
v_{RMS} [mm/s]	Vertikálně [V]	0,72	1,08	2,19	2,12
	Horizontálně[H]	1,10	1,02	3,64	2,30
	Axiálně [A]	1,35	3,30	4,37	4,61
a_{RMS} [g]	Vertikálně [V]	1,36	4,31	6,56	3,14
	Horizontálně[H]	1,61	2,11	2,19	1,08
	Axiálně [A]	2,02	5,82	3,84	3,09
Poznámka		Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži

Hodnoty rychlosti vibrací naměřené na ložiskách L1-VP6-Č a L2-VP6-Č jsou podle tabulky v hodnotách, které jsou označeny jako pásmo A/B. Pouze zvýšená axiální hodnota poukazuje na možnou nadcházející závadu na ložisku L2-VP6-Č. Naměřené hodnoty zrychlení vibrací poukazují na špatný stav těchto ložisek, a dokonce na ložisku L2-VP6-Č ve všech měřených směrech hodnoty spadají do pásma C/D což je pásmo, ve kterém by se toto zařízení neprodleně mělo odstavit od provozu a v nejkratší době provést opravu této části zařízení. Ložiska L3-VP6-Č a L4-VP6-Č jsou podle naměřených hodnot v tabulce jak rychlostí, tak zrychlení vibrací v pásmu C/D.



Obrázek 5.18 – Obálka zrychlení vibrací ve vertikálním směru pro ložisko L3-VP6-Č

Praktická část

Na obrázku 5.18 je zobrazeno frekvenční spektrum zrychlení vibrací, které detekuje závady na ložisku L3-VP6-Č ve vertikálním směru. Podle spektra špiček lze vidět zřejmou závadu na ložisku. Na ložisku je zřejmé poškození jak vnějšího, tak vnitřního kroužku, poškození klece a závady na válečkách ložiska. Podle obr. 5.18 závadu může způsobovat nesprávně natažené klínové řemeny.



Obrázek 5.19 – Termostníček čerpadla Warman 300 PG-PC pro VP6



Obrázek 5.20 – Termostníček motoru čerpadla Warman 300 PG-PC pro VP6

Tabulka 5.9 - Hodnoty termostníčku zařízení Warman 300 PG-PC pro VP6

Odražená zdánlivá teplota	28 °C
Emisivita	0,95
Přenos	0,99
Teplota ovzduší	25 °C
Relativní vlhkost	81%
Rychlost proudění vzduchu	do 0,5 m.s ⁻¹
Vzdálenost IR termokamery od objektu	do 1m
Stav	I. stupeň
Oteplení soustavy	8 °C
Zatížení soustavy	100%

Praktická část

Naměřené teplotní záznamy nepřesahovaly dovolenou mez. Maximální naměřená teplota byla 60 °C, což považujeme za normální provozní teplotu motoru. Teplota ložisek se taktéž nachází v přípustné provozní teplotě, a nepoukazuje tak na žádnou závažnější poruchu zařízení.

Vyhodnocení:

Podle naměřených hodnot na ložisku L2-VP6-Č a L3-VP6-Č je zřejmé, že závadu způsobilo špatné natažení klínových řemenů, které toto zařízení pohání. Proto bylo provedeno seřízení řemenů a byla doporučena výměna vadných ložisek.

5.4.2 Diagnostika čerpadla Warman 300 PC-PG pro VP4

Čerpadlo, je ukotvené kotevnými šrouby na betonovém podlaží, toto ukotvení má za úkol držet stabilitu celého čerpadla. K betonovému podlaží je taktéž ukotvená ocelová konstrukce, kde je připevněný motor, pohánějící pomocí klínového řemene čerpadlo.

Technické parametry čerpadla Warman 300 PC-PG:

Jak už bylo zmíněno u předchozího čerpadla i tenhle typ čerpadla pohání 3fázový asynchronní motor od firmy Siemens, který disponuje výkonem 250 kW a pracuje při otáčkách 1488 ot/min s frekvencí 50 Hz. Čerpadlo pracuje při otáčkách zhruba 885 ot/min.

Tabulka 5.10 – Naměřené hodnoty vibrací na čerpadle Warman 300 PC-PG pro VP4

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500-25600 Hz (a_{RMS})					
Popis		Motor		Čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1488		885	
v_{RMS} [mm/s]	Vertikálně [V]	2,5	2,1	3,9	3,51
Poznámka		Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži

Jelikož v době kontrolního měření nebylo toto zařízení v provozu, proto byla vyhodnocena data poskytnuta externím pracovníkem, který provádí diagnostiku v pravidelných intervalech v této firmě. Poskytnuté data jsou měřena pouze ve vertikálním směru, ale pro kontrolní diagnostiku tohoto zařízení nám tyto data vystačí. Hodnoty naměřené na ložiskách motoru mají podle tabulky hodnoty spadající do pásma A/B. Naměřené hodnoty ložisek čerpadla, spadají podle tabulky do pásma A/B. Hodnoty čerpadla jsou trochu zvýšené, proto musí být kladen důraz na jejich častější kontrolu a v případě zhoršení by měla být provedena výměna vadných funkčních komponentů.

5.5 Diagnostika vertikálních čerpadel Warman 200 SV-SP Č1 a Č2

Tento typ čerpadla se nachází pod granulačními zásobníky v malé čerpadlovně. Čerpadla Warman 200 SV-SP jsou vertikální a mají za úkol čerpat přepadovou vodu z granulačních zásobníků zpět do usazovacích nádrží „bazénů“. Na technický stav působí ve velké míře vodní pára, jelikož se tyto vertikální čerpadla nachází přímo nad nádržemi s vodou, které mají teplotu okolo 50°C.



Obrázek 5.21 – Čerpadla Warman 200 SV-SP-Č1 a Č2

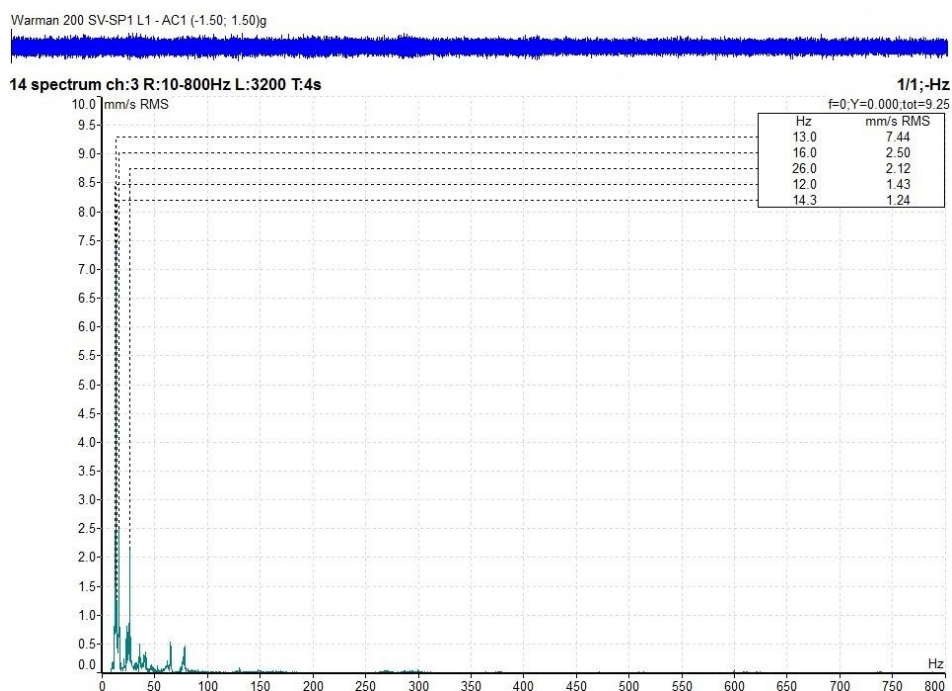
Čerpadla jsou ukotvená šrouby M30 k ocelové základně, která se nachází nad zásobníkem s čerpanou směsí.

Technické parametry:

Zařízení pohání 3f asynchronní motor firmy Siemens o výkonu 110 kW s pracovními otáčky 1488 ot/min. Provozní otáčky čerpadla jsou 800 ot/min.

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500-25600 Hz (a_{RMS})					
Popis		Motor		Čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1488		800	
v_{RMS} [mm/s]	Vertikálně [V]	6,06	5,18	2,41	1,47
	Horizontálně[H]	5,62	8,47	1,93	1,83
	Axiálně [A]	9,19	11,5	5,94	6,02
a_{RMS} [g]	Vertikálně [V]	0,214	0,114	0,246	0,517
	Horizontálně[H]	0,216	0,179	0,134	0,304
	Axiálně [A]	0,304	0,105	0,523	0,675
Poznámka		Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži

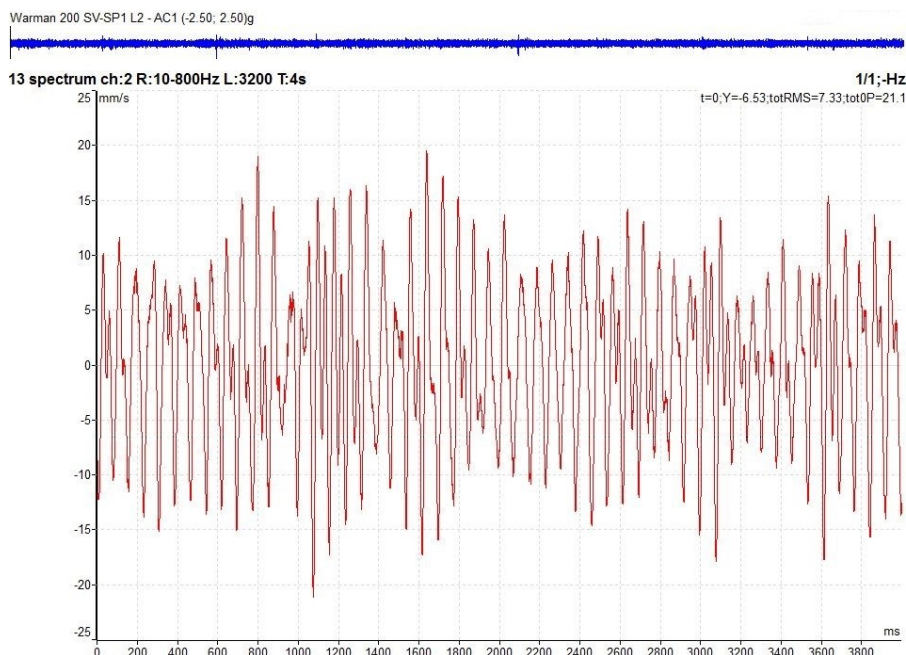
Na základě naměřených hodnot rychlostí vibrací u L1-Č-Č1 a L2-Č-Č1, spadají tyto hodnoty do pásma C/D. Některé naměřené hodnoty výrazně převyšují dovolenou mez pásma C/D, proto by mělo být toto zařízení odstaveno z provozu a měla by být provedena oprava, která je v tomto případě zcela nutná. Co se týče naměřených hodnot rychlosti vibrací u ložiska L3-Č-Č1 a L4-Č-Č1 nejsou tyto hodnoty ještě tak kritické, ale poukazují na možný výskyt nastávajícího problému. Tyto mechanismy by měly být sledovány, aby nezpůsobily větší škodu zařízení.



Obrázek 5.22 – Spektrum rychlosti vibrací v axiálním směru ložiska L1-Č-Č1

Praktická část

U tohoto spektra rychlostí vibrací je první otáčková frekvence na hodnotě 13,3 Hz. Tato hodnota odpovídá otáčkám o hodnotě zhruba 800 ot/min. Vysoké špičky spektra v axiálním směru detekují zřetelnou poruchu na zařízení. Jelikož se jedná o axiální směr, může jít o ohnutý hřídel nebo nesprávné ustavení. Ovlivňovat spektrum v tomto směru můžou i vadné nebo málo napnuté klínové řemeny.



Obrázek 5.23 – Časové spektrum rychlosti vibrací v horizontálním směru pro ložisko L2-Č-Č1

Časové spektrum rychlosti vibrací v horizontálním směru poukazuje na viditelnou závadu, kterou znázorňuje přiložená tabulka 5.11 naměřených hodnot.



Obrázek 5.24 – Spektrum rychlosti vibrací v axiálním směru ložiska L2-Č-Č1

Taktěž z tohoto spektra rychlostí vibrací je u ložiska L2-Č-Č1 viditelná závada.

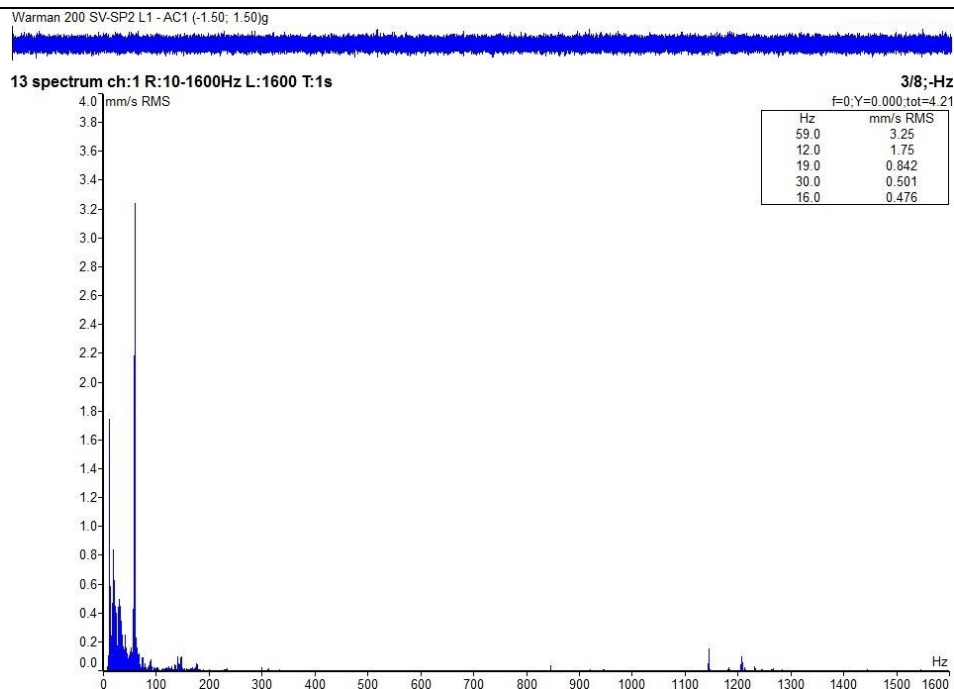
Vyhodnocení:

Podle naměřených hodnot je zřejmé, že se jedná o špatné ustavení motoru vůči čerpadlu. Příčinou vzniku vibrací může být i konstrukce celého zařízení, která je z konstrukčního hlediska špatně řešena. Jelikož zařízení je stále v provozu, byla doporučena kontrola ustavení komponentů vůči sobě.

Tabulka 5.12 – Naměřené hodnoty vibrací pro čerpadlo Warman 200 SV-SP-C2

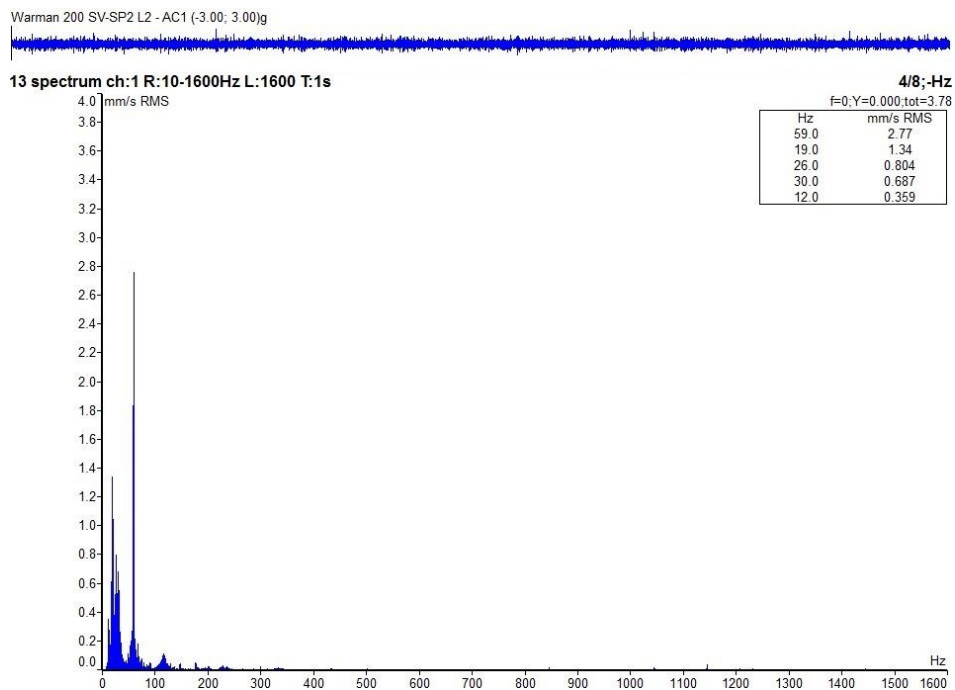
Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10-1000 Hz (v_{RMS}) a efektivní hodnoty zrychlení vibrací v pásmu od 500-25600 Hz (a_{RMS})					
Popis		Motor		Čerpadlo	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max. ot/min		1488		800	
v_{RMS} [mm/s]	Vertikálně [V]	5,16	5,27	1,89	0,974
	Horizontálně[H]	2,69	2,79	1,43	1,28
	Axiálně [A]	4,01	3,56	2,09	2,12
a_{RMS} [g]	Vertikálně [V]	0,216	0,192	0,286	0,380
	Horizontálně[H]	0,178	0,181	0,329	0,464
	Axiálně [A]	0,342	0,122	0,301	0,233
Poznámka		Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži	Při zátěži

U tohoto čerpadla byly naměřené hodnoty rychlosti vibrací na ložisku L1-Č-Č2 a L2-Č-Č2 ve vertikálním směru ležící v pásmu C. U motoru tohoto čerpadla se vyskytují větší vibrace, proto by se měla provádět pravidelnější kontrola tohoto zařízení, aby nedošlo k poškození motoru nebo celého zařízení. Zbytek naměřených hodnot vibrací je v dovolených mezích, proto předpokládám, že ložiska jsou v pořádku.



Obrázek 5.25 – Spektrum rychlosti vibrací ve vertikálním směru ložiska L1-Č-Č2

V průběhu lze vidět jako nejdominantnější otáčkovou frekvenci 59 Hz. Příčinou těchto špiček je pravděpodobně nesouosost zařízení.



Obrázek 5.26 – Spektrum rychlosti vibrací ve vertikálním směru ložiska L2-Č-Č2

Spektrum rychlosti ložiska L2-Č-Č2 také poukazuje na závadu týkající se souososti nebo nevývahy.

Vyhodnocení:

Provedla se kontrola řemenic a klínových řemenů. V tomto případě byla doporučena úprava ustavení funkčních komponentů, sledování zařízení a průběhů změn jeho technického stavu.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo poskytnout základní informace o bezdemontážních diagnostických technikách, díky kterým můžeme včas diagnostikovat vznikající poruchu zařízení. Základem pro efektivní sledování stavu strojů bylo měření a pozorování fyzikálních veličin a parametrů souvisejících se stavem stroje.

V teoretické části byly zhodnoceny příčiny vzniku vibrací a jejich projev ve frekvenčním spektru, snímače vibrací využívané podle typu snímané veličiny, metody správného uchycení snímače a kvalifikace signálů s následnou frekvenční analýzou pomocí FFT. Nedílnou částí teoretické práce byla také termodiagnostika, která má za úkol dohlížet na hodnoty přístupné provozní teploty.

Vibrodiagnostika byla považována za hlavní diagnostickou metodu v této práci, jelikož dovoluje z naměřených dat vyhodnotit vliv vibrací na chod zařízení a jeho efektivitu výroby, a v případě překročení přípustných hodnot uplatnit vhodné opatření údržby. Díky této metodě byl zhodnocen technický stav vertikálních a horizontálních vodních čerpadel v těžkém průmyslu, u kterých se často vyskytují poruchy jednotlivých částí zařízení vlivem vibrace. Čím větší se vyskytovaly vibrace na daném přístroji, tím víc se zhoršoval stav daného zařízení a rostoucí amplituda na daných frekvencích poukazovala na poruchy jednotlivých součástí stroje.

Pro diagnostiku čerpadel byl používán přístroj od firmy ADASH VA4 PRO se softwarem A4410 Virtual Unit. Spolu s přístrojem byly použity čtyři druhy akcelerometrů, které dovolují snímat jak rychlost, tak i zrychlení vibrací. Při vyhodnocování byla dodržována norma ČSN ISO10816-7, která rozděluje velikost vibrací do 4 pásem.

Měření bylo prováděno na horizontálních a vertikálních čerpadlech typu Warman, které plní svojí funkci jako kalová čerpadla. Z naměřených hodnot a průběhu vibrací bylo vyhodnoceno, že většina zařízení a zvláště jednotlivé komponenty jsou ve špatném stavu a měla by se provést v blízké době jejich výměna. Měření potvrdilo, že vibrodiagnostika je účinný nástroj na zkoumání technického stavu zařízení. Hlavními nevýhody tohoto měření byl značný vliv okolí na měření, a to například teplotou prostředí, připevněním daného senzoru k měřenému objektu a mnoho další. Při hodnocení závady na stroji dle jednotlivých grafů, bylo obtížné charakterizovat zdroj vibrací, jelikož pro otáčkovou frekvenci a její násobky je charakteristických víc možných poruch.

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Blatovi Ph.D. za odbornou pomoc při měření a vyhodnocení dat a za cenné rady, a připomínky které mi při vypracování této práce dal. Dále bych chtěl poděkovat panu Bronislavu Ruzzovi, vedoucímu střediska údržby ve firmě Třinecké železářny a.s., za poskytnutí technického zázemí a potřebných informací k dokončení této práce.

Použitá literatura

- [1] HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.
- [2] LEGÁT, Václav. Management a inženýrství údržby. Praha: Professional Publishing, 2013. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [3] Vibrační diagnostika. In: *Aplikační list - vibrační diagnostika* [online]. Ostrava: ESOS Ostrava, 2008, s. 2 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://diagnostikastroju.cz/wp-content/uploads/2017/11/aplikacni-list-vibrodiagnostika.pdf>
- [4] ANTUNOVIC, R. *ROLE AND IMPORTANCE VIBRODIAGNOSTICS IN MAINTENANCE TECHNICAL SYSTEM: Trends in the Development of Machinery and Associated Technology* [online]. 2011, , 4 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.403.9962&rep=rep1&type=pdf>
- [5] BRUEL a KJAER. *Measuring vibration* [online]. In: . Denmark, 1982, s. 42 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>
- [6] BLATA, J. Expertní aspekty diagnostického systému vibrací rotačních strojů. Disertační práce na Fakultě strojní VŠB – TU Ostrava, Katedra výrobních strojů a konstruování. Vedoucí: Jurman, J. Ostrava, 2011. 117 s
- [7] HELEBRANT, F. *Vibrační diagnostika VIB 01 - Základy vibrodiagnostiky*, Ediční středisko DTI, Bohumín 2007, 159 s.
- [8] HELEBRANT, František. *PROVOZ, DIAGNOSTIKA A ÚDRŽBA STROJŮ*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3028-5.
- [9] BERRY. Ilustrovaná tabulka pro diagnostiku vibrací: dle Berryho. Ostrava: Oborová práce, 2008. Technical associates of Charlotte. P. C. R-0894-4.
- [10] ZUTH, Daniel a František VOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. 2010, -(1), 5 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010_01_40375_5744/
- [11] Technická univerzita Ostrava, Katedra mechaniky [online]. 2009 [cit. 2019-04-21]. Snímače Vibrací. Dostupné z WWW: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/EXPME_4.pdf
- [12] VOJÁČEK, Antonín. Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů. *Automatizace* [online]. Praha: HW server, 2014, 2. Únor 2015 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>

- [13] Vibration technical guide. *IMV Corporation* [online]. Japan: Copyright© IMV Corporation [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: http://imv-tec.eu/pr/vibration_measuring/chapter03/
- [14] TŮMA, J.: Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.
- [15] BILOŠ, Jan. *Vibrační diagnostika: školicí texty kurzů profesního vzdělávání*. Bohumín: Diagnostický a technický institut Bohumín, 2007. Vibrace, DTI 07/VIB 07/.
- [16] ZUTH, Daniel a František VOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. 2010, -(1), 5 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010_01_40375_5744/
- [17] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [18] TOMEH, E., NĚMEČEK P., 2010. *Vibrační diagnostika základních závad strojů*, Liberec, s. 64.
- [19] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [20] JENČÍK, Josef. *Technická měření*. 3. přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1981.
- [21] KREIDL, Marcel. *Měření teploty – senzory a měřicí obvody: Senzory neelektrických veličin*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [22] KABEŠ, Karel. *Snímače pro dotykové měření teploty – přehled trhu*. *Automatizace* [online]. 2006, roč. 49, č. 7 – 8, s. 486.
- [23] OMEGA. *Zpravodaj pro měření a regulaci: Bezdotykové měření teploty*. 2. vyd. 83 s. 1.
- [24] GRUNER, Klaus-Dieter. *Principles of Non-Contact Temperature Measurement* [online]. 2003, , 29 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF
- [25] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin, díl 2. ISBN 80-7300-180-2.
- [26] *Hodnoty emisivit nejdůležitějších materiálů* [online]. Praha: Testo, 2019 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: www.testo.com
- [27] *Bezdotykové měření teplotních polí II* [online]. 2017, 15(19) [cit. 2019-04-07]. ISSN 1214-1674.

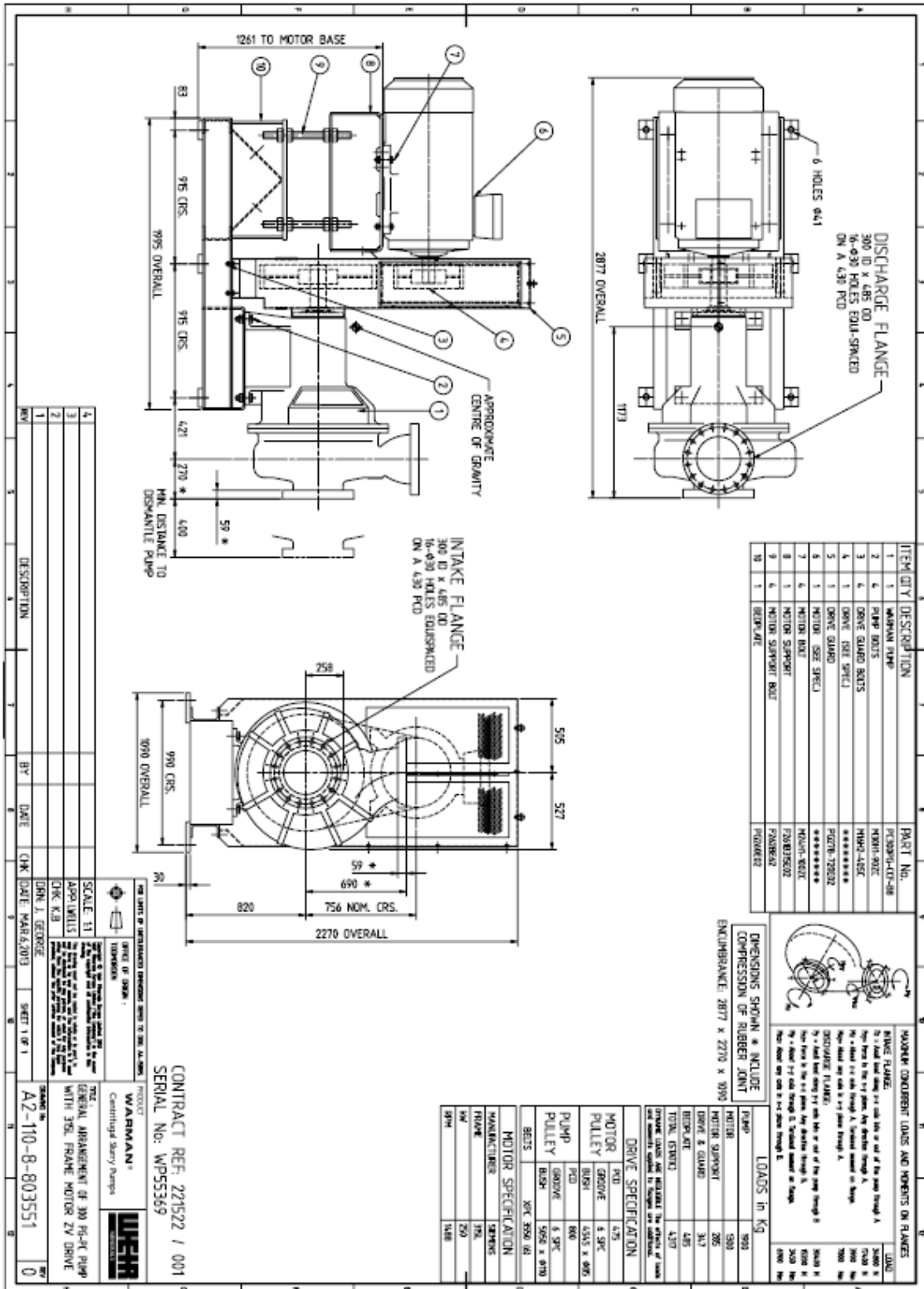
- [28] JENČÍK, J.: Bezdotykové měření teploty pyrometry. *Automatizace*, 1999, roč. 42, č. 4, s. 274–276.
- [29] *TERMOKAMERA FLIR AX8* [online]. Praha: w-technika group s.r.o [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-ax8/>
- [30] Termokamera Fluke TiS10. *FLUKE* [online]. Fluke Corporation, 2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.fluke.com/cs-cz/produkt/termalni-zobrazovani/termokamery/zakladni-rada/fluke-tis10>
- [31] SOVA, Jan. Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití. In: *All for power* [online]. Praha: AF POWER agency, 2007, 2014 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [32] HRUŠKA, Jan. Radiální hydrodynamická čerpadla. *Čerpadla* [online]. Ostrava: OSTRAVSKÁ UNIVERZITA, 2008 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: http://katedry.osu.cz/kpv/čerpadla-jh/Jan_Hruska_MUC_soubory/page0014.htm
- [33] The classic Warman® AH® pump. In: *WEIR: WARMAN® Centrifugal Slurry Pumps* [online]. Copyright © 2015, Weir Slurry Group [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.global.weir/assets/files/product%20brochures/Warman%20Centrifugal%20Slurry%20AH%20Pump.pdf>
- [34] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika. In: *Vibrační diagnostika* [online]. 2012, s. 142 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/BilosovaVIBDI_skripta.pdf
- [35] STUDENÝ, Jaromír. Nízkonapěťový standardní motor Simotics 1LE1. In: *MM spektrum* [online]. 2013 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-na-veletrhu-amper-2013.html>
- [36] A4400 VA4 Pro: Nejvýkonnější 4-kanálový analyzátor. *ADASH*[online]. Ostrava: Copyright © 2019 Adash, 1991, 2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://adash.com/documents/A4400/Adash-A4400-VA4-Pro-ii-manual-cz.pdf>
- [37] AC102 – 1A Series: Product Features. *Connection Technology Center, Inc.* [online]. USA: © Connection Technology Center, 2014 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.ctconline.com/fileup/3DNEWPDF/AC102series_datasheet_3D.pdf
- [38] AC104 - 1A Series: Product Features. *Connection Technology Center, Inc.* [online]. USA: © Connection Technology Center, 2014 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.ctconline.com/fileup/3DNEWPDF/AC104series_datasheet_3D.pdf
- [39] HS-100 Accelerometer. *Hansford Sensors* [online]. Buckinghamshire: © 2019 Hansford Sensors [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.luchsinger.it/contents/products/data_sheet_serie_hs-100-5B1-5D.pdf

- [40] MTN/2200S-4P Series. *Monitran: Sensors for industry* [online]. London: © Monitran [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://www.monitran.com/Portals/0/datasheets/2200S-4P_DS0273.1.pdf
- [41] Fluke TiS55 Infrared Camera. *Fluke* [online]. Washington: 2019 Fluke Corporation, 1995 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-cameras/tis55>
- [42] ČSN ISO 10816-7: Vibrace – Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 7: Odstředivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích

Přílohy

- Příloha A: Výkresová dokumentace čerpadla Warman 14-12 GG
- Příloha B: Výkresová dokumentace čerpadla Warman 300 PG-PC
- Příloha C: Výkresová dokumentace čerpadla Warman 200 SV-SC

Priloha B2



DRIVE SPECIFICATION

Motor Details Standard
110 KW - 6 Pole - 315SN1
Cast Iron Frame

Pump Speed 800 Rpm

DRAWING NOTES

- △ Discharge Drillings to suit ANSI B16.5 150lb Flange Inner Diameter Q200 Outer Diameter Q343 8 Holes Q22 298 P.C.D. Off Centers
- △ Fixing 4 Holes Q28 For M24 Foundation Bolts
- △ Bolts For M24 Foundation Bolts
- △ Priming level. *C1E = 2500mm*
- △ D Length 1800
- △ View on Suction Pipe.
- △ Suction Pipe Length 1600
- △ Gasket not supplied.
- △ Motor Length 986
- △ Terminal Box Height 492
- △ Max Pulley Centres.
- △ Lifting Lugs.

Pump drawn at a 'D' length of 1800.
Motor drawn to typical dimensions.

Pump flanges drawn to ANSI, some dimensions may vary from the ANSI or DIN Standard.
Dynamic loads are negligible.
All dimensions in mm.

Contract Note

NOT TO BE USED FOR PURPOSES ONLY ! CONSTRUCTION !

NOMINAL MASS Kg	2098	© WARMAN INTERNATIONAL LTD 2000. WARMAN INTERNATIONAL LTD is the owner of the copyright subsisting in this drawing and these designs, specifications and instructions. They must not be used, reproduced or copied in whole or in part in any form or by any means, nor may the information there contained, which is confidential to WARMAN INTERNATIONAL LTD be disclosed to any person, without the prior written consent of WARMAN INTERNATIONAL LTD. The drawing has been delivered and received on the express conditions that it may be used only for the specific purpose for which it has been provided, may not be used in any way which may injure or cause loss directly or indirectly to WARMAN INTERNATIONAL LTD or any related corporation and will be returned to WARMAN INTERNATIONAL LTD immediately on completion of the task for which it has been provided, or on demand.
Pump	2098	
Motor	980	
Drive	563	
Total (Static)	3641	

Title	20MSV-SP PUMP WITH Z DRIVE 'D' LENGTH 1800 AND SUCTION PIPE LENGTH 1600	Date	23/11/2000
Customer	Trinec Steel a.s.	Reference	P/7200075S/Q, pol. 2-1
WARMAN INTERNATIONAL LT	OFFICE OF ORIGIN: TONNORDEN	Issue	0